

エネルギー科学研究科
エネルギー社会・環境科学専攻修士論文

題目： 放射線量可視化システムにおける
拡張現実感用トラッキング手法の開発

指導教員： 吉川 榮和 教授

氏名： 前嶋 真行

提出年月日： 平成17年2月9日(木)

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景と目的	3
2.1 ふげん発電所における解体作業の現状と課題	3
2.2 拡張現実感技術を利用した放射線量可視化システム	4
2.2.1 拡張現実感技術	4
2.2.2 拡張現実感技術を利用した作業支援例	7
2.2.3 放射線量可視化システムへの拡張現実感技術の適用	9
2.2.4 拡張現実感技術利用の課題	9
2.3 研究の目的	11
第 3 章 バーコードマーカを用いたトラッキング手法の開発	12
3.1 既存の代表的なトラッキング技術	12
3.2 解体作業支援において要求されるトラッキング技術	16
3.3 要求仕様を満たすトラッキング手法の構成	18
3.3.1 要求仕様を満たすトラッキング技術	18
3.3.2 マーカの特徴	19
3.3.3 バーコードマーカを用いたシステムの特徴	21
3.4 ARToolKit マーカとバーコードマーカを併用したシステムでの処理の流れ	23
3.5 バーコードマーカの設計	23
3.5.1 バーコードマーカの形状と識別法	23
3.5.2 バーコードマーカ作成上の制約条件	24
3.5.3 バーコードマーカの素材	26
3.6 バーコードマーカを用いたトラッキング手法	27
3.6.1 処理の概要	27
3.6.2 バーコードマーカの領域抽出	27
3.6.3 バーコードマーカの符号情報抽出	31
3.6.4 バーコードマーカの識別	33

3.6.5	6つの特徴点を利用した位置・姿勢関係の算出	33
第4章	提案手法によるトラッキングの実験用システムの開発	34
4.1	ハードウェア構成	34
4.2	ソフトウェア構成	37
第5章	トラッキング手法の評価実験	38
5.1	バーコードマーカとカメラの距離と角度の変化に対するロバスト性評価 実験	38
5.2	バーコードマーカとカメラの距離と明るさの変化に対するロバスト性評 価実験	47
5.3	バーコードマーカ間の距離の変化に対するロバスト性評価実験	53
5.3.1	バーコードマーカ間の奥行き方向の距離の変化に対するロバス ト性評価実験	54
5.3.2	バーコードマーカ間の横方向の距離の変化に対するロバスト性 評価実験	59
5.4	動作速度評価実験	63
5.5	ふげん発電所での動作確認実験	66
5.6	まとめと今後の課題	81
第6章	結論	82
	謝辞	84
	参考文献	86
付録A	AR Tool Kit	付録A-1
A.1	AR Tool Kitの概要	付録A-1
A.2	マーカ検出処理	付録A-1
A.2.1	取り扱う座標系	付録A-1
A.2.2	マーカ抽出	付録A-4
A.2.3	マーカ識別	付録A-4
A.2.4	4頂点位置検出	付録A-5
A.3	マーカの3次元位置推定	付録A-5
A.3.1	回転移動成分 $R_{3 \times 3}$ の推定	付録A-6

A.3.2	平行移動成分 $T_{3 \times 1}$ の推定	付録 A-8
A.3.3	変換行列 T_{cm} の修正	付録 A-8
A.4	カメラキャリブレーション	付録 A-9
付録 B	6つの自然特徴点を利用したカメラの位置と姿勢推定	付録 B-1

目 次

2.1	拡張現実感技術の例	5
2.2	拡張現実感の位置付け	5
2.3	対象物の直感的理解	6
2.4	情報内容の容易な理解	7
2.5	航空機ワイヤーハーネス作成支援システム	8
2.6	KARMA	8
2.7	拡張現実感技術による放射線量可視化	9
2.8	ARToolKit のマーカ	10
3.1	拡張現実感システム	19
3.2	バーコードマーカ	20
3.3	システムの流れ	22
3.4	バーコードマーカの詳細	23
3.5	バーコードマーカ作成上の制約条件 1	25
3.6	バーコードマーカ作成上の制約条件 2	25
3.7	フェルトによるバーコードマーカ	26
3.8	原画像	28
3.9	2 値画像	28
3.10	バーコードマーカの抽出方法 1	29
3.11	バーコードマーカの抽出方法 2	29
3.12	バーコードマーカの抽出方法 3	29
3.13	バーコードマーカの抽出方法 4	30
3.14	バーコードマーカの抽出方法 5	30
3.15	バーコードマーカの抽出方法 6	30
3.16	抽出情報	31
3.17	バーコードマーカの回転	32
4.1	ハードウェア構成	34

4.2	実験用システムの写真	35
4.3	ソフトウェア構成	37
5.1	距離と角度の変化に対するロバスト性評価実験の方法	40
5.2	距離 0.5m、角度 0°で撮影したバーコードマーカの2値画像	41
5.3	距離 1.0m、角度 0°で撮影したバーコードマーカの2値画像	42
5.4	距離 2.0m、角度 0°で撮影したバーコードマーカの2値画像	42
5.5	距離 3.0m、角度 0°で撮影したバーコードマーカの2値画像	43
5.6	距離 4.0m、角度 0°で撮影したバーコードマーカの2値画像	43
5.7	距離 5.0m、角度 0°で撮影したバーコードマーカの2値画像	44
5.8	距離 6.0m、角度 0°で撮影したバーコードマーカの2値画像	44
5.9	距離 1.0m、角度 60°で撮影したバーコードマーカの2値画像	45
5.10	距離 3.0m、角度 60°で撮影したバーコードマーカの2値画像	45
5.11	距離 5.0m、角度 60°で撮影したバーコードマーカの2値画像	46
5.12	距離と明るさの変化に対するロバスト性評価実験の方法	48
5.13	距離 2.0m、照度均一 1000lux で撮影したバーコードマーカの2値画像	50
5.14	距離 3.0m、照度均一 1000lux で撮影したバーコードマーカの2値画像	51
5.15	距離 4.0m、照度均一 1000lux で撮影したバーコードマーカの2値画像	51
5.16	距離 5.0m、照度均一 1000lux で撮影したバーコードマーカの2値画像	51
5.17	距離 2.0m、照度 1200 ~ 250lux で撮影したバーコードマーカの2値画像	52
5.18	距離 3.0m、照度 1200 ~ 250lux で撮影したバーコードマーカの2値画像	52
5.19	奥行き方向の距離の変化に対するロバスト性評価実験の方法	55
5.20	奥行き方向の距離の変化に対するロバスト性評価実験の結果	56
5.21	距離 4.0m のバーコードマーカを基準に修正を行った距離 4.0m と距離 3.0m のバーコードマーカの2値画像	57
5.22	距離 5.0m のバーコードマーカを基準に修正を行った距離 5.0m と距離 3.0m のバーコードマーカの2値画像	57
5.23	距離 5.0m のバーコードマーカを基準に修正を行った距離 5.0m と距離 4.0m のバーコードマーカの2値画像	58
5.24	横方向の距離の変化に対するロバスト性評価実験の方法	60
5.25	横方向の距離の変化に対するロバスト性評価実験の結果	61
5.26	バーコードマーカ間の横方向の距離 50pixel で撮影したバーコードマーカ	61
5.27	バーコードマーカ間の横方向の距離 100pixel で撮影したバーコードマーカ	62

5.28	バーコードマーカ間の横方向の距離 150pixel で撮影したバーコードマーカ	62
5.29	バーコードマーカ間の横方向の距離 200pixel で撮影したバーコードマーカ	63
5.30	バーコードマーカの抽出に要した時間	65
5.31	バーコードマーカの抽出に要した時間と位置・姿勢関係の算出に要した 時間の合計	66
5.32	作業環境の地図	67
5.33	照度を計測した場所を示した地図	68
5.34	バーコードマーカを設置した場所を示した地図	72
5.35	ふげん発電所構内 1 の原画像	75
5.36	ふげん発電所構内 1 の 2 値画像	76
5.37	ふげん発電所構内 1 のバーコードマーカ抽出部ライン表示	76
5.38	ふげん発電所構内 2 の原画像	77
5.39	ふげん発電所構内 2 の 2 値画像	77
5.40	ふげん発電所構内 2 のバーコードマーカ抽出部ライン表示	78
5.41	ふげん発電所構内 3 の原画像	78
5.42	ふげん発電所構内 3 の 2 値画像	79
5.43	ふげん発電所構内 3 のバーコードマーカ抽出部ライン表示	79
A.1	AR Tool Kit の使用例	付録 A-2
A.2	システムが取り扱う座標系	付録 A-3
A.3	マーカの例	付録 A-7
A.4	格子点のフィッティング 1	付録 A-11
A.5	格子点のフィッティング 2	付録 A-12
B.1	視点・画像面・その上での座標軸を表すベクトル	付録 B-4

表 目 次

3.1	各トラッキング技術の長所	13
3.2	各トラッキング技術の短所	14
4.1	ハードウェア	34
4.2	CCD カメラの仕様	35
4.3	ビデオキャプチャの仕様	36
4.4	ノート PC の仕様	36
5.1	距離と角度の変化に対するロバスト性評価実験の条件	39
5.2	距離と角度の変化に対するロバスト性評価実験の結果	40
5.3	距離と明るさの変化に対するロバスト性評価実験の条件	48
5.4	紙のバーコードマーカを用いた場合での距離と明るさの変化に対するロ バスト性評価実験の結果	50
5.5	フェルトのバーコードマーカを用いた場合での距離と明るさの変化に対 するロバスト性評価実験の結果	50
5.6	奥行き方向の距離の変化に対するロバスト性評価実験の条件	55
5.7	横方向の距離の変化に対するロバスト性評価実験の条件	59
5.8	動作速度評価実験の条件	64
5.9	照度を計測した場所での照明条件	69
5.10	設置したバーコードマーカの各種条件	73

第 1 章 序論

日本は石油や石炭などのエネルギー資源が少ないこと、また国土が狭いため大規模な土地が必要な風力発電、水力発電などの発電方法では十分な発電量が得られないこと、さらには近年の地球温暖化問題から、原子力発電による電力供給がますます重要な役割を担うようになってきている。しかし、原子力発電の持つ危険性から十分厳重な管理と安全な運用が必要とされている。また、近年の電力自由化の流れの中で、原子力発電プラントは経済性の向上も求められるようになってきており、安全性と信頼性を確保した上で効率の良い運用が必要とされている。

一方、原子力発電プラントの建設、解体についても原子力発電の危険性から、他の発電プラントとは異なり十分に安全な対策を講じて建設、解体する必要がある。特に、プラント解体の際には放射能汚染物質を扱う。そのため、建設計画よりもむしろ解体の際の方がより安全にかつより綿密に解体計画を練る必要がある。また、解体作業はすでに発電を行わないプラントに対して行うため、発電によるプラントからの収益は望めない。そのため採算性はなく、解体作業に必要な経費はなるべく安価であることが望ましい。

福井県敦賀市に建設されたふげん発電所は、純国産エネルギーとも言えるプルトニウムとウランの混合酸化物、MOX (Mixed-Oxide) 燃料の再利用を行う新型転換炉である。新型転換炉開発については、その役割が終了しつつあることから撤退し、平成 15 年に運転を停止することが基本的に決定された。運転終了後は、「原子炉等規制法」に基づき、適切に設備を維持・管理し、十分な安全性を確保するとともに、約 10 年間の廃止措置準備期間とし、廃止措置計画の具体化に必要な開発・研究を行うことが決まっている。

現状の解体方法では、作業指示書に記載された放射線量情報を基に危険な領域を避けながら解体作業を行っている。そのため、記憶間違いや物忘れなどのヒューマンエラーが発生する可能性が高く、解体作業の効率が悪化し、解体作業員の被曝量が必要以上に増加してしまうという問題がある。

こういった、ヒューマンエラーによる被曝の低減、安全性の確保、および安価な解体作業を実現するためにヒューマンマシンシステム (HMS : Human Machine system) の研究が行われている。その中でも拡張現実感技術 (AR : Augmented Reality) の利

用が検討されている。拡張現実感技術は直感的で容易な理解を可能にする技術で、複雑な作業の効率化と、ヒューマンエラーの低減に効果があり、高い安全性を保ちながら解体作業を行えると期待されている。

そこで本研究では、解体作業中に必要な情報である放射線量に注目し、放射線量可視化に適応するための拡張現実感技術 (Augmented Reality : AR) の開発を行う。具体的には、拡張現実感技術の要素技術であるトラッキング技術に注目し、ふげん発電所に適したトラッキング技術の開発を目的とする。トラッキング技術とは、現実世界に対する重畳表示を正しい位置・向きで実現するために必要な要素技術で、拡張現実感技術を利用する際には必要不可欠な技術である。拡張現実感技術による放射線量の提示を実現すれば、放射線量確認の際のヒューマンエラーの低減や、解体作業の効率化ができると期待される。

本論文は、第1章の序論を含め、6章で構成されている。第2章では、ふげん発電所における解体作業の現状と課題についてまず述べ、次いで拡張現実感技術について説明し、本研究の目的と意義を述べる。第3章では、本研究で開発したバーコードマーカを用いたトラッキング手法について説明する。第4章では、提案手法によるトラッキングを実装した実験用システムについて説明する。第5章では、提案手法によるトラッキングを実装した実験用システムを用いて行った評価実験について述べる。第6章では、本研究の結果をまとめ、今後の課題を述べる。

第 2 章 研究の背景と目的

本章では、まず本研究の背景について述べる。次いで、本研究に関連する技術とその応用例について述べる。最後に本研究の目的について述べる。

2.1 ふげん発電所における解体作業の現状と課題

新型転換炉ふげん発電所は平成 15 年 3 月 29 日に原子炉としての運転を終了した。運転終了後のふげん発電所では発電していないものの、約 10 年間に廃止措置準備期間とし設備の管理と安全の確保を行っている。またこの準備期間を利用し、廃止措置のために必要な計画の立案、および技術の研究・開発を行っている^[1]。

原子力発電プラントでの解体作業においては、放射能汚染物質を扱う。ふげん発電所の廃止措置についても同様で、解体作業に従事する作業員は、解体作業中、被曝する恐れがある。作業員には 1 日での累積的な被曝量や、年間での累積的な被曝量に制限があり、解体作業はその制限を越えないように計画的に、かつ迅速に進める必要がある。そのため、作業員は被曝量の少ない道を通りながら迅速に解体作業を行うことで、累積的な被曝量を低減させる必要がある。

ふげん発電所での解体作業は、4、5 人程度のグループごとに解体作業を行い、1 人の監督官の指揮の下、各人の累積的な被曝量が均等になるように作業を割り振り、解体作業を行うことが計画されている。以下に解体作業の流れについて説明する。

1. 作業指示書に記載された放射線量分布情報と地図を確認し、解体作業場までの被曝量の少ない道のり、および解体物を搬出するための被曝量の少ない道のりを記憶する
2. 記憶をたよりに解体作業場まで移動する
3. 解体箇所の切断を行う
4. 解体物を所定の位置まで搬出する

以上の工程を繰り返す。こういった現状の方法では、以下のようなヒューマンエラーが考えられる。

1. 作業指示書確認の際に、間違っただのりを記憶してしまう

2. 記憶した道のりを作業中に忘れてしまう
3. 記憶は正しいが、勘違いで道のりを間違えてしまう
4. 作業指示書確認の際に、間違った切断箇所を記憶してしまう
5. 記憶した切断箇所を作業中に忘れてしまう
6. 記憶は正しいが、勘違いで切断箇所を間違えてしまう

こういったヒューマンエラーの積み重なりにより作業効率は低下し、被曝量が増加する。こういった問題を起こさないようにするために、現在までにふげん発電所の3次元CADによるデータベースシステム、バーチャルリアリティによる解体作業シミュレーションシステムといった解体作業計画段階での支援システムなどの研究・開発が進められている^[1]。

一方解体着手中において上記で述べたヒューマンエラーは、作業指示書を再確認することで解決できるが、作業指示書を確認している間にも被曝する恐れがあるため望ましくない。このように、原子力発電プラントでの解体作業では、ヒューマンエラーによる被曝の軽減が課題となってくる。特に、上記で説明した6つのヒューマンエラーの内、1番目、2番目、および3番目のヒューマンエラーを解決するためには、被曝量の少ない安全な場所から、容易で正確で迅速に放射線量を確認し、正しい順路を確認できることが望ましいと考えられる。こういった放射線量可視化を実現する技術として現在、拡張現実感技術が期待され、ハルデン原子炉プロジェクトなどの研究が行われている^[2]。

2.2 拡張現実感技術を利用した放射線量可視化システム

前節で述べたように、原子力発電プラントでの解体作業には多くの問題がある。これらの問題を解決する方策として、作業員に直感的理解を促す情報提示を行うことが有用であると考えられており、現在、次世代HMS (Human Machine System) を用いた作業支援が検討されている^[3]。本節では、次世代HMSの1つ、拡張現実感技術の概要を説明した後、拡張現実感技術を利用した作業支援例を説明し、放射線量可視化システムへ適用した際の利点と問題点について述べる。

2.2.1 拡張現実感技術

拡張現実感技術 (AR:Augmented Reality) とは、現実空間と仮想空間を融合した複合現実感 (MR:Mixed Reality) の一種で、現実空間の映像上にコンピュータを用いて



図 2.1: 拡張現実感技術の例

生成した文字や図形などの情報を重ね合わせて、現実空間の情報を「拡張」する技術である [4][5]。図 2.1 は拡張現実感技術を用いて、実在する机の付近に、CG によるランプと2つの椅子を重ね表示している。

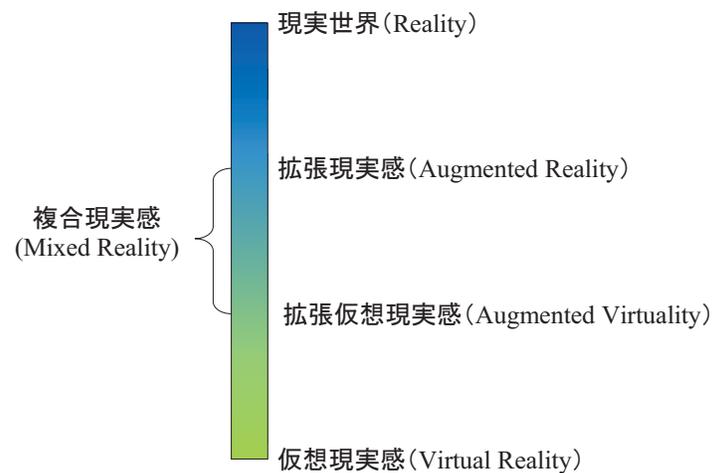


図 2.2: 拡張現実感の位置付け

コンピュータで生成された仮想世界に人間が没入する仮想現実感 (VR:Virtual Reality) や現実世界との関係は図 2.2 に示すようになり、拡張現実感 は現実世界に近いインタフェースである。

このような拡張現実感技術には以下のような特徴がある。

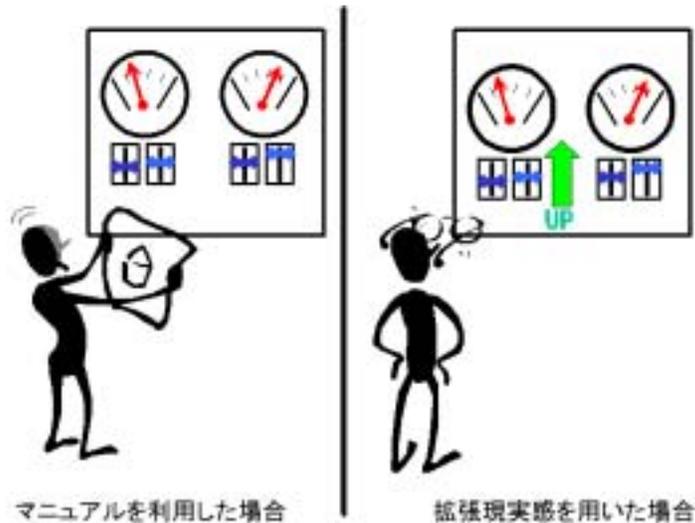


図 2.3: 対象物の直感的理解

1. 対象物の直感的理解が可能

拡張現実感技術を用いると、拡張情報が対象物上に重畳表示されるため、ユーザは情報の対象物を直感的に理解できる。例えば、図 2.3 に示すような機器のレバーを上げる操作を行う作業を考える。従来の方法では、マニュアルと実際の機器を見比べて操作の対象物となるレバーを特定する。こういった方法では、ユーザは操作の対象物を特定するためにマニュアルと実際の機器を視線移動を繰り返して特定する必要があり、操作対象物の特定に負担がかかる。また、操作の対象となるレバーを別のレバーと間違える可能性もある。一方、拡張現実感技術を用いた場合、文字や矢印などの拡張情報を操作の対象となる物体上に重畳表示できるため、ユーザは直感的に操作の対象を特定できる上、別のレバーと間違える可能性も少ない。

2. 情報内容の容易な理解が可能

拡張情報には、矢印などの絵を用いることもできるため、ユーザは拡張情報の内容を容易に、即座に、かつ確実に理解することができる。例えば、図 2.4 に示すように、文字による重畳表示と、矢印による重畳表示を考える。文字による重畳表示の場合、ユーザは重畳表示されている文字をすべて読み終えた時点で操作の対象となっているレバーをどう動かすべきか理解できる。一方、矢印による重畳表示の場合、ユーザは矢印を見た時点で即座に操作の対象となっているレバーをどう動かすべきか理解できる。また、文字のみの情報では意味が不明確になる場合

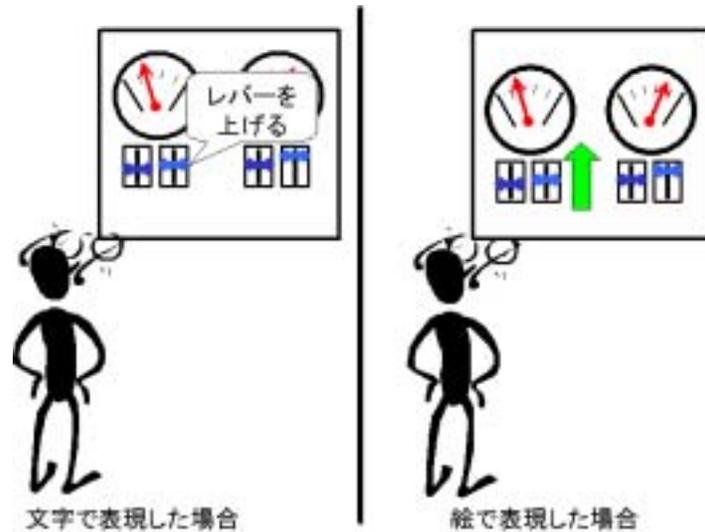


図 2.4: 情報内容の容易な理解

があり、情報の本来の意味とユーザの解釈が一致していない可能性もある。しかし、図のようにユーザにとって理解が容易な形で情報を提示することで、意味を明確に伝えることができる。

これら 2 つの特徴は、まず第 1 段階として提示したい情報と現実世界内の対象とを視覚的に結びつけ、そして第 2 段階として情報提示の表現手段をより豊かにするという関係にある。つまり「なに」を「どうする」という作業内容を、より直接的な表現で提示したものと言える。このような特徴から、拡張現実感技術は作業を支援するインタフェースとして有効と考えられる。

2.2.2 拡張現実感技術を利用した作業支援例

前節で述べた拡張現実感技術の特徴を生かした作業支援の例として、ボーイング社の航空機ワイヤーハーネス作成支援システムが実用化されている^[6]。このシステムでは、航空機の電子機器配線ハーネスの配線を行う際、図 2.5 に示すように、配線すべきハーネスの種類と位置を、作業員が装着している光学シースルー HMD を用いて基板上に重畳表示することで、作業効率の向上を図っている。

また、レーザープリンタのメンテナンスの支援を目的とした支援システムとして、KARMA がある^[7]。このシステムでは、図 2.6 に示すように、目的の作業を行うには、パーツをどのように動かせば良いかを HMD を介して提示している。

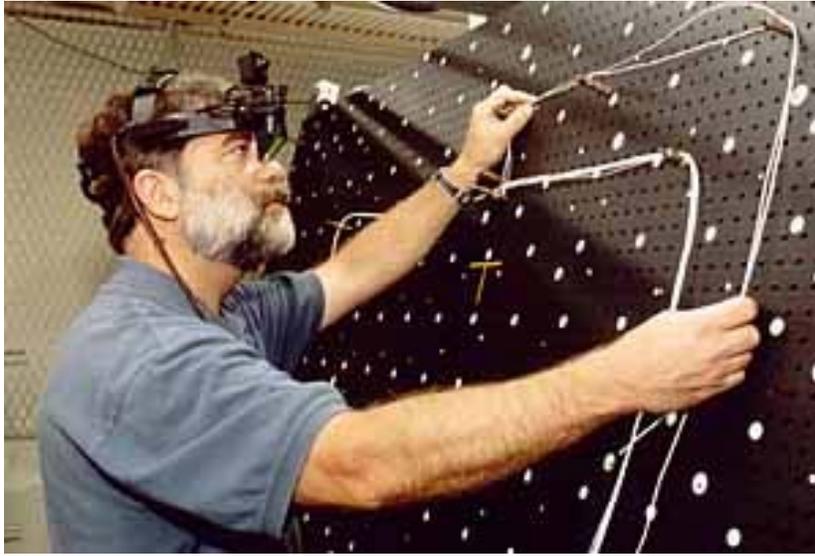


図 2.5: 航空機ワイヤーハーネス作成支援システム

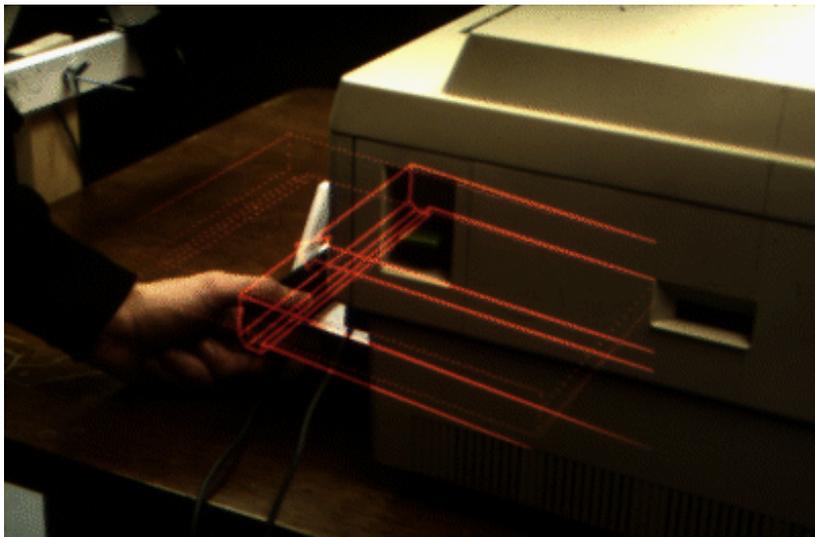


図 2.6: KARMA

2.2.3 放射線量可視化システムへの拡張現実感技術の適用

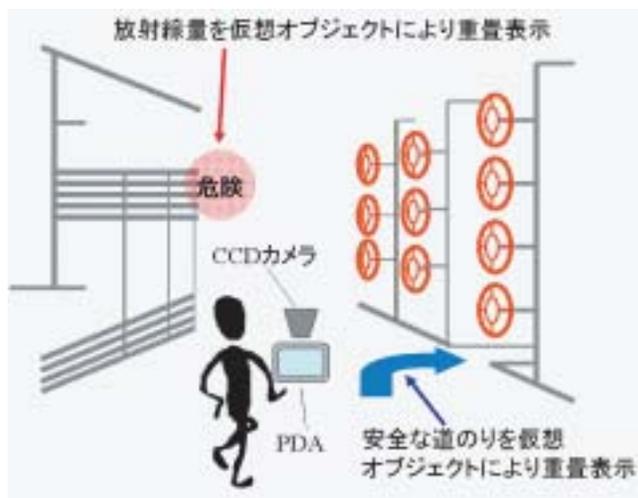


図 2.7: 拡張現実感技術による放射線量可視化

本研究で開発するシステムは、ふげん発電所構内の中低度汚染区域での使用を想定している。また開発するシステムは、作業員が被曝量の少ない安全な場所で立ち止り、拡張現実感技術を利用して周辺の放射線量を確認し、道のりの確認、決定などを行うことを想定している。図 2.7 が示すように、拡張現実感技術を用いて放射線量可視化、および危険性の喚起を行うと、作業員は直感的に危険な領域、安全な道のりを理解でき、安全性、作業効率が向上すると期待される。また、記憶間違いや物忘れといったヒューマンエラーの低減にもつながると考えられる。

2.2.4 拡張現実感技術利用の課題

一方、拡張現実感技術を利用して実用的な支援システムを構築する上で、インタフェースの開発とトラッキング技術開発の 2 点が主要課題として挙げられる^[4]。中でもトラッキング技術は、拡張現実感技術の特徴である現実世界との重畳表示を、正しい位置、向きで実現するためには欠かせない技術であり、これを解決しなければ拡張現実感技術を利用した作業支援の実現は不可能である。

トラッキングとは、ユーザと情報提示対象物との位置・姿勢関係を取得することである。位置は対象物から見てどこにいるかを 3 次元座標で表したもので、姿勢はどの方向を向いているかを 3 次元空間の各軸からの角度で表したもので、合わせて 6 自由度の値である。このトラッキング技術によって得られる位置・姿勢情報を利用して、現

実世界に重ねて提示する情報の位置と向きが決められる。つまり、拡張現実感技術を利用するには、まず初めに解決しなければならない問題であると言える。今までにも以下に示すように様々な研究がなされている。

- カメラ画像を画像処理することによって行うトラッキング
- 加速度センサ・ジャイロセンサなどを装着して動きを計測するトラッキング
- 超音波センサや赤外線センサなどの機器を環境に設置して用いるトラッキング
- GPS(Global Positioning System) を利用するトラッキング

図 2.5 で示した航空機ワイヤーハーネス作成支援システムでは、作業員の頭部に取り付けられた磁気センサを用いて作業員の頭部の位置を計測することでトラッキングを行っている。また、図 2.6 で示した KARMA では、対象となるプリンタの主要なパーツにあらかじめ人工マーカを貼り付けておき、超音波を利用して各人工マーカを検出することでトラッキングを行っている。

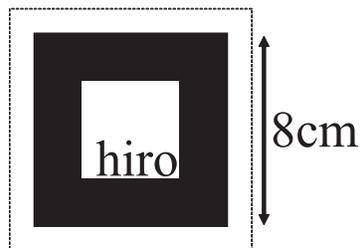


図 2.8: ARToolKit のマーカ

こういった様々なトラッキング手法の中でも、加藤らが開発した ARToolKit に代表される人工マーカの 3 次元位置情報をカメラ画像から取得するトラッキング手法が、精度が高く、かつ容易で実用的である [8]。ARToolKit では図 2.8 に示すような正方形の人工マーカの 4 頂点の現実空間上の既知の位置情報を基にトラッキングを行う。

拡張現実感技術を原子力発電プラントの解体作業に適応する場合、作業員の被曝量を低減させるため、放射能汚染物質から離れた被曝量の少ない場所から直感的に放射線量を把握できる必要がある。そのため、比較的広域でのトラッキングが必要となる。

人工マーカはカメラ画像内である程度の大きさで撮影されなければマーカとして抽出できないため、正方形の人工マーカを用いて遠距離からのトラッキングを実現しようとする、人工マーカを大きくする必要がある。また、人工マーカによるトラッキング手法では重畳情報は人工マーカ周辺にしか表示することができない。そのため、重畳情報を表示させたい場所の付近に人工マーカを貼る必要がある。

ふげん発電所構内は新型転換炉であるため多くのパイプが張り巡らされている。また、機器のほとんどが構内の中央付近に設置されている。大きな正方形の人工マーカを貼れる場所の多くは壁に限られるため、構内の中央付近に存在する機器周辺に貼り付けることができない。そのため、放射線量情報の重畳表示は壁に向かう方向、つまり構内の外郭に向かう方向でしか行うことができず、構内中央付近の放射線量情報を重畳表示しにくいという問題がある。構内中央に存在する機器周辺の放射線量情報を重畳表示させるためには、機器の周辺に人工マーカを貼り付けられることが望ましい。

2.3 研究の目的

そこで本研究では、放射線量可視化に拡張現実感技術を適応したシステムを構築する際に必要となる、ふげん発電所に適したトラッキング技術の開発を行う。ふげん発電所では壁のほか、構内中央付近の機器の周辺にも多くのパイプが張り巡らされている。そこでパイプに貼り付けることができる、細長いバーコード型の人工マーカ（以下、バーコードマーカ）を用いたトラッキング技術を開発することで、遠距離からのトラッキングを実現することを提案する。

放射線量可視化を拡張現実感技術を用いて行うことで、作業員に周辺の放射線量の直感的理解、作業効率の向上、ヒューマンエラーの低減を促すことができる。また、提案手法によるトラッキングを実現すると、遠距離からのトラッキングを行える人工マーカをふげん発電所構内の大部分の場所に貼り付けることができるようになるため、様々な場所から周辺の放射線量を容易に確認できるようになると期待される。

本研究はバーコードマーカによるトラッキングが遠距離から実現できるか、特にその際のトラッキング精度が現実的に利用可能な範囲の誤差であるか、またトラッキング速度は現実的に利用できる速度であるか確認することを目的とする。

一方、ふげん発電所構内には複雑な形状をした機器が多く存在する。トラッキングを行う際に、そういった機器を背景にバーコードマーカをパイプに貼り付け、そのカメラ画像からバーコードマーカを抽出する必要がある。その際には、バーコードマーカの周りに機器の陰などによるバーコードマーカの抽出を妨げるノイズが多く含まれると考えられる。しかし、この問題は本研究の目的と異なるので、研究対象としない。さらに、放射線量情報を重畳表示するインターフェース設計についても今後の研究にゆだねる。

第 3 章 バーコードマーカを用いたトラッキング 手法の開発

本章では、まず既存の代表的なトラッキング技術について述べる。次いで本研究で要求されるトラッキング技術について述べ、要求仕様を満たすトラッキング手法の構成、設計、認識手法について述べる。

3.1 既存の代表的なトラッキング技術

まず、表 3.1 および表 3.2 に既存のトラッキング技術について長所と短所を示す。次いで、それぞれについて説明する。

人工マーカを用いたトラッキング

人工マーカを用いたトラッキングとは、壁や天井などに 3 次元位置と姿勢が既知のマーカ、いわゆる人工マーカを貼り付け、ユーザの頭部などに取り付けたカメラでこの人工マーカを撮影し、得られた人工マーカの画像を解析して、人工マーカとカメラ間の位置・姿勢関係を求める方法である^[8]。また、人工マーカを複数用いることでより精度や安定性を高める手法も開発されている^[9]。人工マーカを用いたトラッキング手法はこれまでも数多くの研究がなされており、精度や安定性が高い手法である。しかし、カメラ画像内に人工マーカが撮影されていない場合には、トラッキングすることができないという問題がある。広範囲のトラッキングに用いる場合には、数多くの人工マーカを設置する必要がある。

自然特徴点を用いたトラッキング

自然特徴点を用いたトラッキングとは、カメラ画像内から特徴的な点（以下、自然特徴点）を抽出し、自然特徴点の 3 次元位置を解析することで、人工マーカの代用として用いる手法である。カメラ画像内から直線を検出して自然特徴点として利用する研究もある^[10]。この手法では、トラッキングを開始した時点での自然特徴点の 3 次元位置を知る必要がある。そのため、この 3 次元位置を知るために、他のトラッキング

表 3.1: 各トラッキング技術の長所

トラッキング手法	長所
人工マーカ	3次元位置と姿勢が既知の人工マーカを利用するため高精度で安定したトラッキングが可能である
	必要な機材が視界画像を撮影するカメラと画像処理を行うコンピュータだけであり、また人工マーカも紙や木などの安価な物を利用できるため、コストがかからない
	人工マーカを正確に認識できる近距離では、比較的精度が高い
自然特徴点	環境から自然特徴点を抽出するため、周囲に機器を設置する必要がない
	周辺環境の情報(自然特徴点の3次元位置)を順次取得していくため、広範囲で利用できる
磁気センサ	安定した磁場内では比較的精度が高い
加速度・ジャイロセンサ	ユーザの動きを直接計測するため、環境に手を加える必要がない
	計算負荷が低いため、リアルタイム性が高い
GPS	カーナビなどで利用実績があり、安定したトラッキングが可能である
	屋外であればどこでも利用できる

表 3.2: 各トラッキング技術の短所

トラッキング手法	短所
人工マーカ	人工マーカが写っていない時は利用できないため、大量の人工マーカを貼付する必要がある
	精度は画像の解像度に依存するため、精度を上げるには高解像度の画像処理が必要になる
自然特徴点	画像から得られた自然特徴点の3次元位置をあらかじめ知っておく必要がある
	複数画像間の特徴点同士を対応付けるのが困難であり、トラッキングに大きな乱れが生じることがある
	精度は画像の解像度に依存するため、精度を上げるには高解像度の画像処理が必要になる
磁気センサ	機器を設置する必要がある、利用環境が限定される
	金属や電子機器など磁場を乱す要因があれば計測結果に歪みが生じる
	磁場内でしか利用できないため、狭い範囲でしか利用できない
加速度・ジャイロセンサ	センサのドリフト成分に起因する誤差を生じやすい
	積分計算の際に、誤差が蓄積しやすい
	得られる値は前回計測時からの変化分であり、絶対位置・姿勢を得るには初期値が必要になる
GPS	電波が届きにくい、屋内環境で利用できない
	一般の利用に際しては、精度の保証がされていない

技術を用いなければならないという問題がある。トラッキングを行うために必要な数の自然特徴点の3次元位置が分かれば、それらの自然特徴点を用いてトラッキングを行い、さらに他の自然特徴点の3次元位置を推定することができる。このように、トラッキングと他の自然特徴点の3次元位置の推定を継続的に繰り返すことで、広範囲でのトラッキングが可能となる。しかし、カメラ画像ごとの同一の自然特徴点に対応付けることが難しい上、自然特徴点の位置精度はカメラ画像の解像度により制限を受けるため、一般的には、計算負荷が高く、トラッキング精度が低い。

磁気センサを用いたトラッキング

磁気センサを用いたトラッキングとは、環境に配置したトランスミッタから発せられる球体状の磁場を用いて、トラッキングを行う手法である^[11]。この手法では、環境にトランスミッタを設置する必要があるため、トラッキングできる範囲が限定される。また、磁場を用いたトラッキングであるため、金属や電子機器など磁場を乱す要因があれば計測結果に歪みが生じるという問題がある。しかし、安定した磁場内では比較的精度が高い。POLHEMUS社のFASTRAKの場合、計測精度は位置が0.8mm、角度が0.15度と高精度である^[12]。

加速度・ジャイロセンサを用いたトラッキング

加速度・ジャイロセンサを用いたトラッキングとは、微少時間ごとに、加速度センサによってユーザの位置の変位を、ジャイロセンサによってユーザの姿勢の変位を計測し、計測開始時の位置・姿勢を平行・回転移動させて現在の位置・姿勢を算出する手法である。しかし、両センサとも時間や環境に起因したドリフト成分が生じるため、正確なトラッキングができないという問題がある。さらに、センサからの値は加速度・角速度であるため、角度・位置の変位を得るには、ジャイロセンサは1回、加速度センサは2回の積分演算が必要となる。積分演算では誤差が蓄積するため、トラッキング精度は低い。そのため、これらセンサを単体で用いるのではなく、加速度センサとカメラ画像を併用したり^[13]、ジャイロセンサとカメラ画像を併用したり^[14]など、補助的な要素として利用されることが多い。また、拡張カルマンフィルタを用いて補正を行う手法もある^[15]。加速度センサやジャイロセンサから得られた変位は、前回計測した時からの変位であり、常に相対位置・姿勢しか求められない。絶対位置・姿勢を求めるには前回計測時の位置・姿勢が必要になる。そのため、最初に得られた計測結果から位置・姿勢を算出するには、計測を開始した時点での作業員の位置・姿勢が必要に

なり、別のトラッキング手法を用いてこれを得なければならない。

GPS(Global Positioning System) を用いたトラッキング

GPS を用いたトラッキングとは、GPS 衛星からの電波信号を受信し経度・緯度情報を得る手法である^[16]。この手法では GPS 端末が衛星との間で信号を送受信するため、屋内環境では使用できないことや、精度が電波状態に大きく左右される問題がある。

3.2 解体作業支援において要求されるトラッキング技術

解体作業支援に用いられるトラッキング技術は、利用環境や用途などの条件を考慮して決定する必要がある。まず、ふげん発電所構内の環境と作業員について説明する。

ふげん発電所構内の特徴

1. 新型転換炉であるためパイプが多い
2. 機器から発せられる騒音が多い
3. 天井の高低差が激しい
4. 通路の幅は狭い場所が多い
5. 全体的に薄暗い
6. 解体作業が進むにつれてインフラが解体されていく

作業員の特徴

1. 安全のためヘルメットを着用する
2. 作業を妨げる機器を身につけることはできない
3. 1グループ4、5人で解体作業を行う

上記のことから、解体作業環境で利用できるトラッキング技術には、以下の制限がある。

解体作業環境におけるトラッキング技術の制限

1. 屋内環境のため、GPS は利用できない
2. インフラが解体されるため、PHS は利用できない
3. 機器の大部分は金属なので、磁気センサは利用できない

4. 解体する環境に様々なセンサを設置することは困難であるため、赤外線や超音波センサは利用できない

また、拡張現実感技術を原子力発電プラントの解体作業において利用する際には、以下のことに留意する必要がある。

解体作業中での利用

本研究では、解体作業中に拡張現実感技術を使用することを想定している。そのため、本研究で用いるトラッキング手法は、解体に伴う環境の変化に対応しやすいことが必要条件である。

遠距離からの利用

作業員は放射能汚染物質からできるだけ離れた、被曝量が少ない場所から拡張現実感技術を用いることが望ましいという点から、遠距離からもトラッキングできることが必要である。ふげん発電所構内の広さ、直線距離を考慮すると、ユーザから最長で5mの距離をトラッキングできる必要がある。

なお、本研究では放射能汚染物質から離れた場所から放射線量を確認できるトラッキング技術を開発することを目的としている。そのため、非常に正確なトラッキングが必要ということではなく、おおまかな放射線量の分布を確認できる程度でよい。重畳情報の表示位置を考慮した場合、トラッキング精度は位置関係の精度よりも姿勢関係の精度の方が重要であると考えられる。

リアルタイムに動作

作業員が即座に放射線量を確認するためには、リアルタイムにトラッキングを行い、放射線量情報を提示する必要がある。処理速度に関してはフレームレートとディレイの概念がある。

フレームレートとはディスプレイ表示において、1秒間に何回画面が更新されるかを表わした値である。例えば1秒間に15回描画が行なわれるなら、描画速度は15フレーム/sと表わされる。一方ディレイとは、遅延、遅れという意味である。例えば、毎秒30フレームの更新速度で画像を出力できるカメラと、入力された画像に対して毎秒10フレームの更新速度で何らかの処理を行いディスプレイに画像を出力するPCがあるとすると、このカメラとPCを接続し、何らかの処理を行わせる。カメラは毎秒30フ

フレームの更新速度、つまり 33ms ごとに画像を PC に対し出力する。しかし PC は毎秒 10 フレームの更新速度であるため、1 つの画像に対して 100ms の処理時間を要す。これはカメラの更新速度は毎秒 30 フレームであるのに、その出力は毎秒 10 フレームであることを意味する。この結果、ディスプレイに表示される画像は 3 フレーム前の画像となる。このような状況をディレイと言う。

毎秒 10 フレームの更新速度ならば違和感を感じない、動きのなめらかな映像の限界だとされている^[4]。本研究で開発するトラッキング手法は、少なくとも毎秒 10 フレーム程度の更新速度を実現する必要がある。

3.3 要求仕様を満たすトラッキング手法の構成

以上のことを踏まえて、ふげん発電所で実現可能なトラッキング手法について説明する。

3.3.1 要求仕様を満たすトラッキング技術

3.1 節で述べた各種トラッキング技術の内、人工マーカによるトラッキングは、3.2 節で考察した解体作業環境におけるトラッキング技術の制限を受けない。さらに、人工マーカは精度・安定性が高い手法である点でも実用的である。また、解体に伴う環境の変化に対しても、人工マーカを貼り付ける場所を変えて、貼り変えた場所の位置情報を登録するだけで対応できる。

代表的な人工マーカによるトラッキング手法としては ARToolKit が挙げられる。ARToolKit では、図 2.8 に示すような正方形の人工マーカ（以下、ARToolKit マーカ）の 4 頂点の位置・姿勢情報を用いてトラッキングを行う。

拡張現実感システムは図 3.1 に示すように、基本的にカメラ、情報処理系、ディスプレイによって構成される。拡張現実感技術の実現には実世界における 3 次元位置・姿勢とカメラ画像における 2 次元位置・姿勢をリアルタイムに対応させる必要がある。ARToolKit では、ARToolKit マーカをカメラが撮影すると、情報処理系がそれを認識し、ARToolKit マーカとカメラの位置・姿勢関係を算出する。

人工マーカはカメラ画像内で、ある程度の大きさで撮影されなければ人工マーカとして認識できない。また、ふげん発電所ではカメラから 5m 離れた場所からトラッキングできることが必要という観点から、ARToolKit マーカによってカメラから 5m 離れた場所からでもトラッキングを行えるようするには、ARToolKit マーカの大きさを変

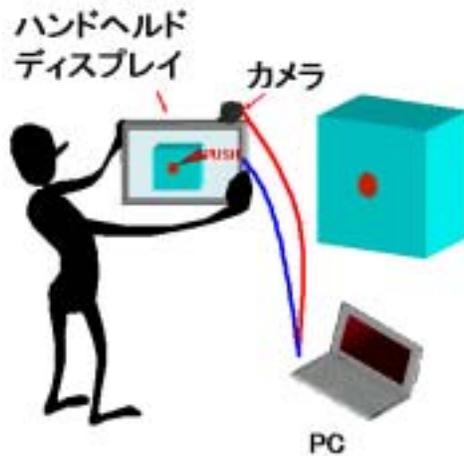


図 3.1: 拡張現実感システム

更する必要がある。ARToolKit マーカを用いてカメラから 5m の距離でトラッキングを実現しようとする、1 辺 30cm 程度の大きさが必要となる。

一方、ふげん発電所構内の機器の多くは構内の中央付近に存在するため、構内中央付近をトラッキングするためには、機器周辺に人工マーカを貼り付ける必要がある。ARToolKit マーカ上の 4 頂点は同一平面上に存在する必要があるため、ARToolKit マーカは機器の形状に合わせて折り曲げて貼り付けることができない。機器の周辺に存在するパイプについても同様に貼り付けることができない。ARToolKit マーカを折り曲げず、そのままの形状で機器・パイプに貼り付けることもできるが、その際には ARToolKit マーカが環境内で突起し、解体作業の妨げになる可能性がある。こういったことから、1 辺 30cm 程度という大きな ARToolKit マーカでは貼れる場所の多くが壁に限られ、構内中央付近に貼り付けることができない。

そこで、新型転換炉のふげん発電所にはパイプがいたるところにあるという特徴を活かし、パイプに巻きつけることのできるバーコードマーカを利用したトラッキング手法を開発する。バーコードマーカをパイプに巻きつけた状態でトラッキングを行うことができれば、バーコードマーカの突起によって解体作業の妨げになる可能性はないと考えられる。また、ふげん発電所構内ではいたるところにパイプが張り巡らされているため、多くの場所でトラッキングを実現できるようになると考えられる。

3.3.2 マーカの特徴

以下に、ARToolKit マーカと本研究で開発するバーコードマーカの特徴を説明する。

ARToolKit マーカ

ARToolKit マーカは図 2.8 に示すような正方形の人工マーカであるため、2次元情報を持つ。3次元位置と画像上の座標との対応が取れている n 点を用いて撮影したカメラの位置を求める問題を、透視 n 点問題 (PnP 問題) と言う^[17]。ARToolKit マーカでは、同一平面上にある正方形の4頂点の3次元位置情報を用いてトラッキングを行う、すなわち P4P 問題を解くことでトラッキングを行っている。そのため、トラッキングは1つの ARToolKit マーカの位置情報のみで実現できる。通常は一辺 8cm 程度の大きさの ARToolKit マーカを用い、その大きさの場合で、ARToolKit マーカとカメラの距離が約 1.5m まで有効にトラッキングができる。そのため、近距離でのトラッキングには適するが、本研究で用いるような複雑な形状をした機器の付近に ARToolKit マーカを貼り付けて遠距離から重畳情報を表示させる場合には不向きである。なお、ARToolKit マーカによるトラッキング手法の詳細については付録 A にて説明する。

バーコードマーカ



図 3.2: バーコードマーカ

バーコードマーカは図 3.2 に示すような直線的な形状をした人工マーカである。ARToolKit マーカのように2次元情報を持つ形状にした場合、バーコードマーカの幅が大きくなり、パイプに貼り付けることができなくなる恐れがあるため、1次元情報を持つ形状にする。なお、バーコードマーカは1次元情報を持つ形状のため、トラッキングに用いる特徴点を一直線上にしか登録することができず、1つのバーコードマーカの3次元位置情報のみからトラッキングを行うことができない。そのため、1直線上にない2つのバーコードマーカの3次元位置情報を用いてトラッキングを行う。

ARToolKit では1つの ARToolKit マーカ上に設定した同一平面上に存在する4点を用いてトラッキングを行う。一方、バーコードマーカでは2つのバーコードマーカを用いる必要があるため、ARToolKit のように、同一平面上に存在する特徴点を用いてトラッキングを行うことは困難である。そのためバーコードマーカの場合では、同一平面上にない6点の3次元位置情報を用いてトラッキングを行う、P6P問題を解く手法でトラッキングを行う^[18]。

具体的には、1つのバーコードマーカに3つの特徴点を設定し、バーコードマーカを貼り付けた場所での特徴点の3次元位置情報を登録する。そして2つのバーコードマーカの位置情報を用いてトラッキングを行う。なお、最小で3つの点の組があればトラッキングを行うことができるが、高次の連立方程式を解く必要があるため、本研究では容易な計算で導出可能となる6点を用いるP6P問題を解くこととする。

なお本研究では、遠距離からのバーコードマーカによるトラッキングができるか確認すること、特にその際のトラッキング精度を評価することが目的である。この目的を達成するためには、同一平面上にない6点からP6P問題を解く方法で遠距離からトラッキングが行えるか評価することで十分である。そのためP4P問題を解いて同一平面上にある2つのバーコードマーカから一意の解を得る方法は実装しない。

3.3.3 バーコードマーカを用いたシステムの特徴

以下に、バーコードマーカを用いたシステムの特徴を説明する。

トラッキング距離により用いる人工マーカを変更

トラッキングを行う範囲は、ふげん発電所構内の大きさを考慮し、人工マーカとカメラの距離が5mの場所からトラッキングができれば十分であると考えられる。ただし、バーコードマーカの場合、カメラとの距離が近距離では2つ同時にバーコードマーカを撮影することは困難であると考えられる。また、遠距離トラッキング用の人工マーカであるため、大きさもある程度大きくなると考えられる。このため、1つのバーコードマーカでもカメラ画像内に収まらない可能性がある。そこで、以下に示すようにARToolKitマーカとバーコードマーカを併用し、人工マーカとカメラの距離によってトラッキングに利用する人工マーカを変更する。

- カメラから2mまでは8cm四方のARToolKitマーカによるトラッキング
- カメラから2～5mまではバーコードマーカによるトラッキング

なお、人工マーカは安全な通路の5m内にいずれかの人工マーカが撮影されるように貼りつけることとする。

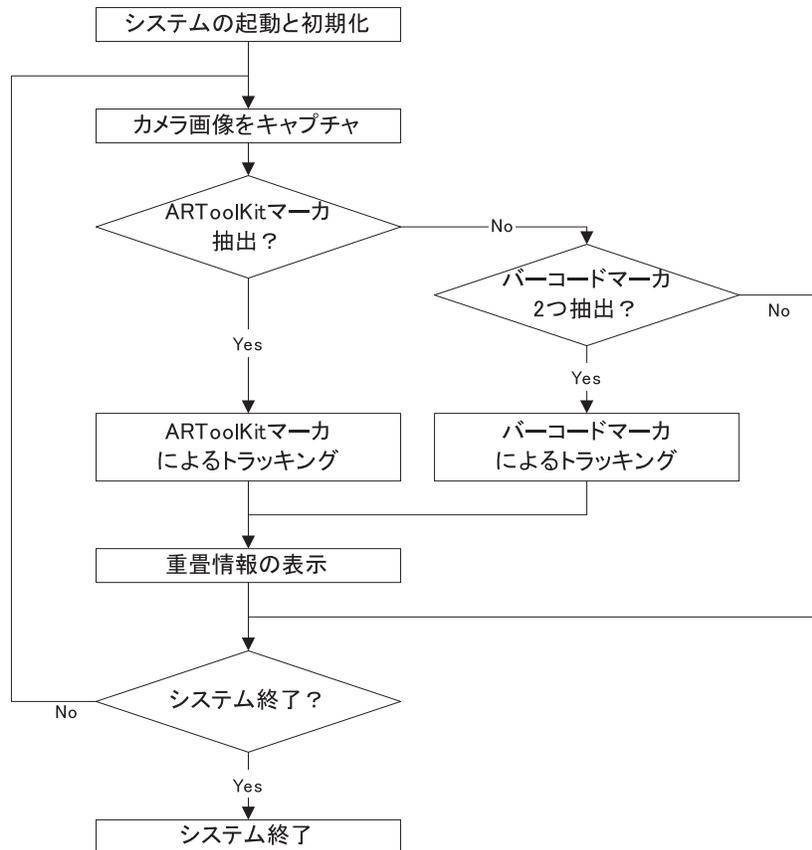


図 3.3: システムの流れ

3.4 ARToolKit マーカとバーコードマーカを併用したシステムでの処理の流れ

ARToolKit マーカとバーコードマーカを併用したシステムでの処理の流れを図 3.3 に示す。カメラ画像から ARToolKit マーカを抽出できた場合、ARToolKit マーカによるトラッキングを行う。カメラ画像から ARToolKit マーカを抽出できなかった場合、バーコードマーカの抽出を試みる。バーコードマーカを 2 つ以上抽出できた場合、バーコードマーカによるトラッキングを行う。バーコードマーカを 2 つ以上抽出できなかった場合は、トラッキングは行えず、次のフレームの処理に移る。

3.5 バーコードマーカの設計

本節では、バーコードマーカの設計方法について述べる。まず、バーコードマーカの形状について述べる。次いで、バーコードマーカの認識手法について述べ、最後にバーコードマーカの素材を述べる。

3.5.1 バーコードマーカの形状と識別法

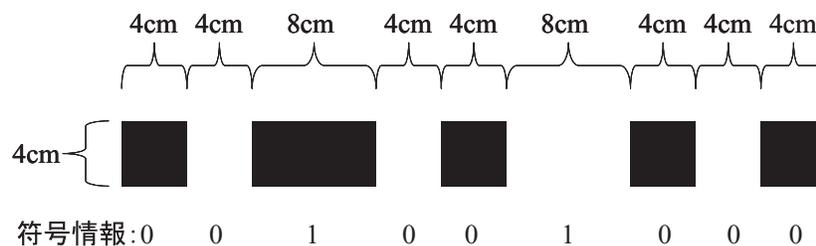


図 3.4: バーコードマーカの詳細

バーコードマーカの形状は様々考えられる。本研究の対象としているふげん発電所構内では数 100m²程度の広さの区域ごとに分かれてる。一方、バーコードマーカは 5m 離れた場所からでもトラッキングできることが要求仕様である。そのため仮に 25m²の範囲内に 4 つのバーコードマーカを貼り付けることでその範囲内をトラッキングできると仮定した場合、100m²程度の広さをトラッキングができる範囲とするには、16 種類のバーコードマーカが必要となる。また、1 つの人工マーカを複数の場所で用いる手法を利用すれば必要なバーコードマーカの種類を減らすことができる^[19]。こういった

ことから、数 100m²程度の広さをトラッキングができる範囲とするためにはバーコードマーカは 100 種類程度あれば十分であると考えられる。

バーコードマーカは図 3.4 に示すように、黒縞が 5 つ、黒縞間の白縞が 4 つとする。バーコードマーカの黒縞の数は、バーコードマーカの抽出を容易にするため、5 つに固定する。また、バーコードマーカは黒縞、白縞の長さを変化させることで他のバーコードマーカとの識別を行う。そのため、バーコードマーカは同一の長さではなく、それぞれ異なる。また、バーコードマーカを容易に識別するために縞の長さを 2 通りとし、短い縞の符号情報を「0」、長い縞の符号情報を「1」とする。例えば、図 3.4 のバーコードマーカの符号情報は「001001000」となる。バーコードマーカはそれぞれのバーコードマーカが持つ符号情報を比較して識別を行う。さらに、バーコードマーカを 5m 離れた場所からカメラで捉えた場合でもバーコードマーカの形状をはっきりと撮影できるように、バーコードマーカの縞の長さを 4cm、8cm、縞の幅を 4cm とする。そのため、バーコードマーカの長さは 36cm から 72cm までとなる。なお、次項で説明するバーコードマーカ作成上の制約条件を課しても 224 種類のバーコードマーカを作成できるため、本研究で開発するバーコードマーカはふげん発電所構内の作業領域内で十分利用できると考えられる。

3.5.2 バーコードマーカ作成上の制約条件

バーコードマーカを作成する際に、以下の制約条件を課している。

1. 「110000000」と「000000011」というような左右対称の符号情報を持つバーコードマーカは作成しない
2. 5 つの黒縞には必ず「1」と「0」の両方の符号情報を加える

人工マーカを認識するには、まず人工マーカを撮影した画像に対して輝度についての固定閾値により 2 値画像を生成する。2 値画像中でのバーコードマーカの黒縞部分は黒の点の集合、いわゆる連結成分が 5 つ連なった形の映像になっている。そして、その 2 値画像をラベリング処理して人工マーカの領域を画像から抽出する。このラベリングの走査が左上から横一列ずつ下に向かって行われるため、連結成分は上から順にナンバリングされる。このため、図 3.5 に示すように、同一のバーコードマーカであっても撮影角度によって 2 通りの符号情報の抽出を行う可能性があるため、制約条件 1 を課している。

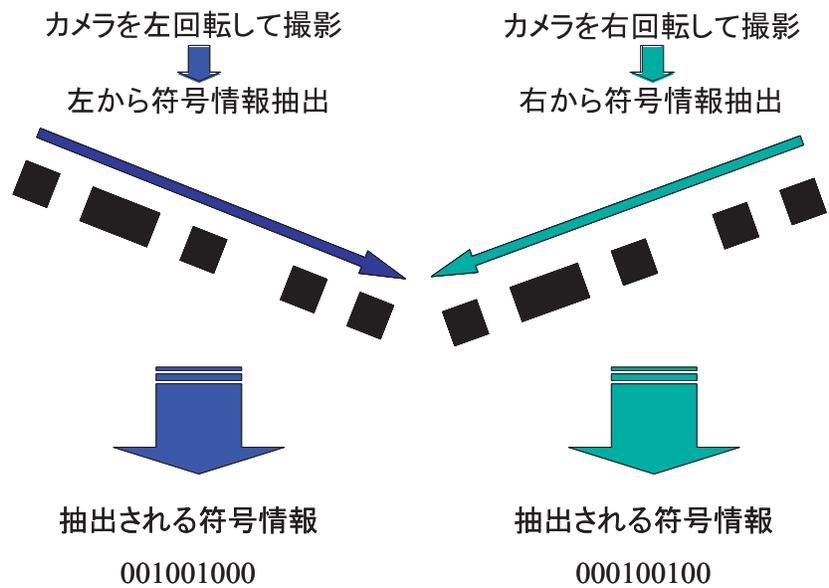


図 3.5: バーコードマーカ作成上の制約条件 1



図 3.6: バーコードマーカ作成上の制約条件 2

また、3.6.3項で説明するバーコードマーカの符号抽出方法では、図3.6に示すような5つの黒縞の符号情報が「0」のみ場合や、「1」のみの場合のように、黒縞の長さがすべて同一の場合、白縞の符号情報を抽出できないため、制約条件2を課している。

3.5.3 バーコードマーカの素材

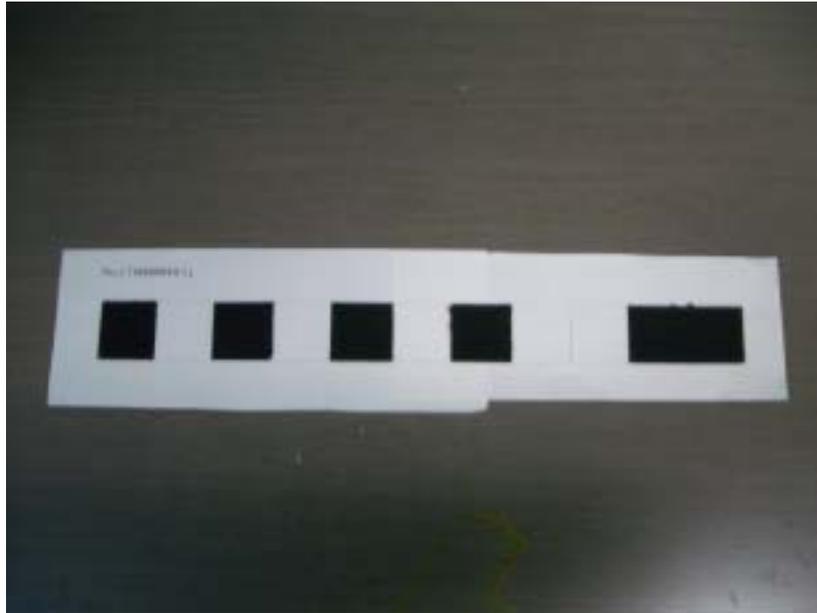


図 3.7: フェルトによるバーコードマーカ

人工マーカの素材には、光が直接人工マーカに当たった場合でも、光をカメラに向けて強く反射しないもの、つまり人工マーカに当たった光を乱反射させ、カメラに向かう反射光を弱められるものを選ぶ必要がある。そこで、本研究では人工マーカの素材として本研究室での昨年の研究結果、適切であると分かったフェルト生地を採用する^[20]。本研究で使用するフェルト生地によるバーコードマーカを図3.7に示す。フェルトは黒縞部分のみに利用し、白縞部分は紙とする。紙部分は光の反射によって白くカメラに写る場合があるが、白縞部であるため問題ない。なお、図3.7が示すように、カメラ画像からバーコードマーカの抽出を容易にするため、バーコードマーカの周りには若干の余白を設けている。

3.6 バーコードマーカを用いたトラッキング手法

本節では、バーコードマーカを用いたトラッキング手法について述べる。まず、バーコードマーカを用いたトラッキング手法の概要を述べ、次いでそれぞれの処理について詳しく説明する。

3.6.1 処理の概要

バーコードマーカは以下の手順でトラッキングに利用される。

1. カメラ画像からバーコードマーカの領域を抽出
2. 抽出したバーコードマーカから符号情報を抽出
3. 抽出した符号情報からどのバーコードマーカであるか識別
4. 2つのバーコードマーカの位置情報からバーコードマーカとカメラの相対的な位置・姿勢関係を算出

以下、それぞれの処理について説明する。

3.6.2 バーコードマーカの領域抽出

バーコードマーカは正方形と長方形の黒縞が一直線上に5つ連なった形状をしている。バーコードマーカの領域抽出とは、カメラ画像中から一直線上にある5つの連結成分を抽出することである。これら一直線上にある5つの連結成分はバーコードマーカの黒縞に該当する。以下に、バーコードマーカの領域抽出方法について述べる。

まず、カメラで撮影したカラー画像を輝度に基づいた固定閾値を用いて2値画像に変換する。得た2値画像に対し、ARToolKitに含まれるライブラリを用いてラベリング処理を行う。図3.8に原画像、図3.9に2値画像を示す。

ラベリング処理した結果、ある程度以上の大きさを持つ画像中の連結成分はARToolKitマーカである可能性が高く、さらにバーコードマーカの黒縞としても大きすぎると考えられるため、バーコードマーカの黒縞部としての候補から除外する。残った比較的小さな連結成分（以下、小連結成分）はバーコードマーカの黒縞部の可能性が高い連結成分である。

これらの任意の小連結成分に対して、その付近にも小連結成分が存在するか調べる。存在する場合は、これら2つの小連結成分のカメラ画像内での重心間の x,y 座標のそれぞれの差を求め位置関係、いわゆるベクトルを求める。次に、今存在を確認した2つ



图 3.8: 原图像

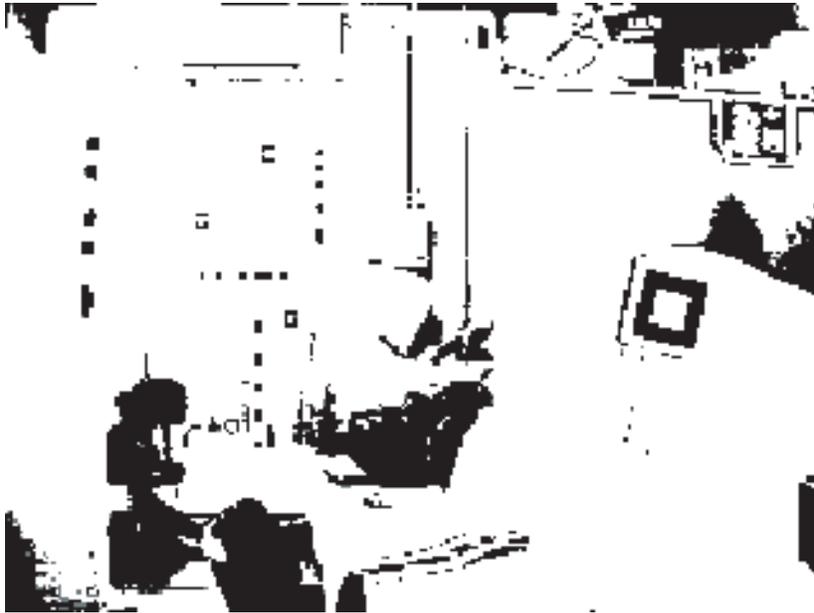
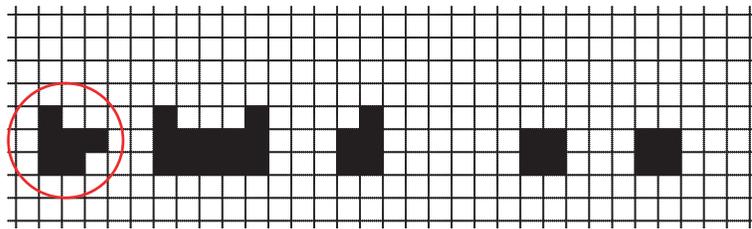


图 3.9: 2 值图像

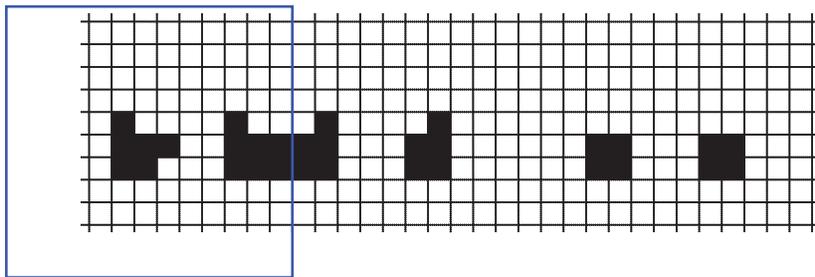
①



任意の小連結
成分を選択

図 3.10: バーコードマーカの抽出方法 1

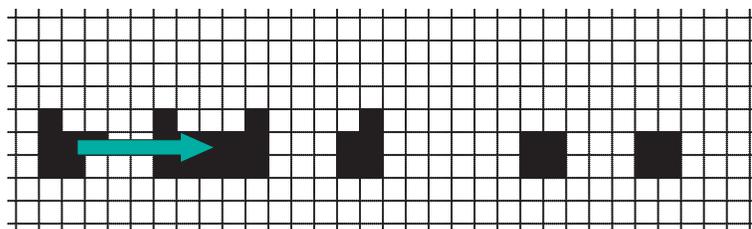
②



付近に小連結成分が
あるか探索

図 3.11: バーコードマーカの抽出方法 2

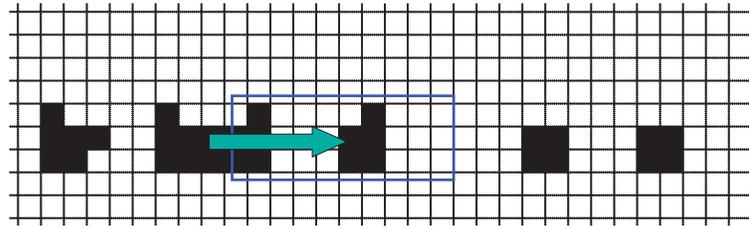
③



2つの小連結成分間の
座標の差を取る

図 3.12: バーコードマーカの抽出方法 3

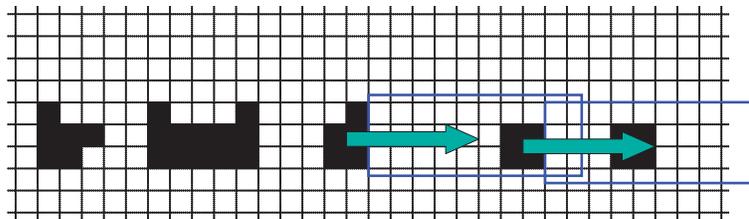
④



先ほど取った差分移動し、
その付近に小連結成分が
あるか探索

図 3.13: バーコードマーカの抽出方法 4

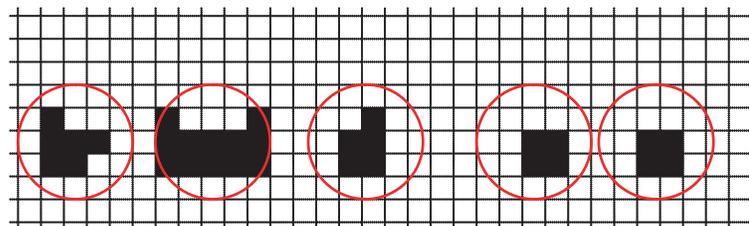
⑤



④の作業を繰り返す

図 3.14: バーコードマーカの抽出方法 5

⑥



5つの小連結成分を発見したときのみ
バーコードマーカとして抽出する

図 3.15: バーコードマーカの抽出方法 6

目の小連結成分を基点としてこのベクトルの指す付近に探索範囲を設定し、3つ目の小連結成分が存在するか調べる。以下、このベクトルを用いて、5つ目の小連結成分が存在するか調べる。バーコードマーカ抽出の様子を図 3.10 から図 3.15 に示す。なお図中の格子はカメラ画像のピクセルを表現しており、また図中のバーコードマーカの符号情報は左から「001001000」である。

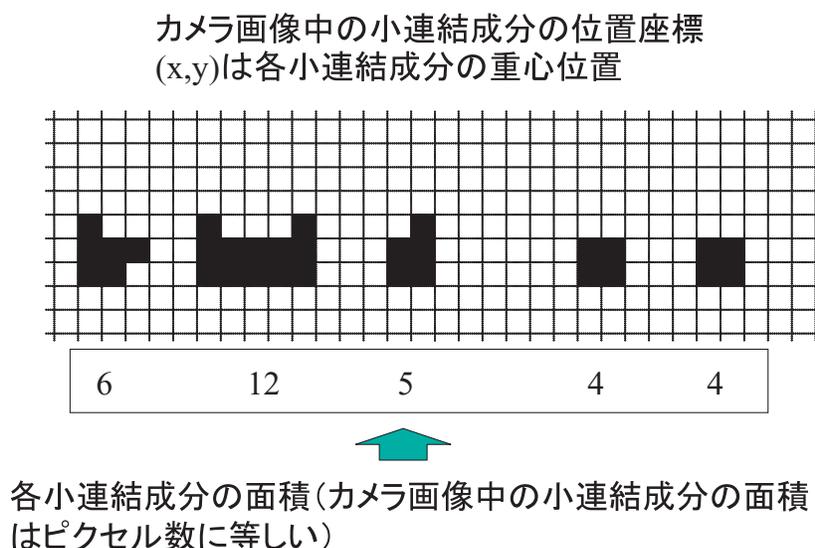


図 3.16: 抽出情報

5つの小連結成分を確認できた場合、図 3.16 に示すように、カメラ画像内でのそれぞれの小連結成分の重心の座標情報と、それぞれの小連結成分の面積情報を抽出する。

また、以上のようなアルゴリズムでバーコードマーカの抽出を行うと、図 3.17 に示すようにバーコードマーカを斜めに貼り付けた場合でも抽出が行える。

3.6.3 バーコードマーカの符号情報抽出

次に、抽出した5つの小連結成分の重心の位置、面積の大きさの情報から黒縞、白縞の符号情報を抽出する。まず、黒縞部分の符号情報の抽出の仕方について説明する。黒縞の長さは2通りに設定してあるので、得られた5つの小連結成分の面積の内、最大の面積と最小の面積の中間の大きさを閾値とし、閾値より面積の大きな小連結成分を符号情報「1」、閾値より面積の小さな小連結成分を符号情報「0」とし、黒縞の符号情報を決定する。図 3.16 の5つの小連結成分では、閾値 $B_{\text{面積閾値}}$ は式 (3.1) のようになる。

$$B_{\text{面積閾値}} = (12 + 4) \div 2 = 8 \quad (3.1)$$

バーコードマーカをどの角度で貼り付けても 正しく抽出できる

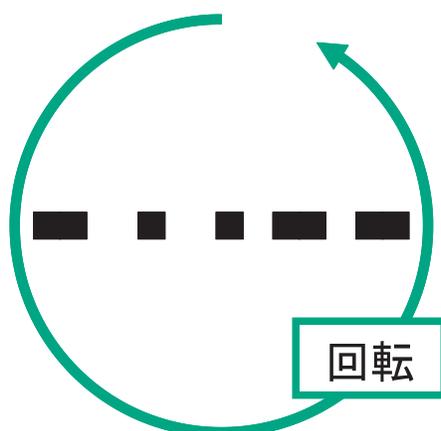


図 3.17: バーコードマーカの回転

またその結果、図 3.16 の黒縞の符号情報は左から順に、「01000」と決定される。この際、制約条件 2 で説明したように、黒縞の大きさがすべて同じであると、この判定法は用いることができない。

次に白縞部分の符号情報の抽出の仕方について説明する。小連結成分から情報を抽出した最初の段階では、小連結成分のカメラ画像内での位置、面積の情報しか分からなかったため、黒縞に関する情報しか得られなかった。しかし、先ほど求めた黒縞の符号情報から黒縞が正方形であるか、長方形であるか分かるため、黒縞の長さを算出できる。黒縞の長さを算出できればそこから黒縞間の長さを決定することができる、つまり白縞の大きさ、符号情報が分かる。

まず、5 つの小連結成分の大きさの情報 $B_{面積_i}(i = 1 \cdots 5)$ 、符号情報 $B_{符号_i}(i = 1 \cdots 5)$ から 5 つの小連結成分の長さ $B_{長さ_i}(i = 1 \cdots 5)$ を求める。符号情報が「0」の場合の小連結成分の長さは式 (3.2)、符号情報が「1」の場合の小連結成分の長さは式 (3.3) で求められる。

$$B_{長さ_i} = \sqrt{B_{面積_i}} \quad (3.2)$$

$$B_{長さ_i} = \sqrt{B_{面積_i} \div 2} \times 2 \quad (3.3)$$

次に、小連結成分の重心間の距離 $BB_{距離_i}(i = 1 \cdots 4)$ を求め、先ほど求めた小連結成分の長さ $B_{長さ_i}$ から白縞部の長さ $W_{長さ_i}(i = 1 \cdots 4)$ を求める。符号情報が「0」の場合の

白縞の長さは式 (3.4)、符号情報が「1」の場合の白縞の長さは式 (3.5) で求められる。

$$W_{長さ_i} = BB_{距離_i} \times \frac{4}{5} - B_{長さ_i} \quad (3.4)$$

$$W_{長さ_i} = BB_{距離_i} \times \frac{6}{5} - B_{長さ_i} \quad (3.5)$$

そして、黒縞の符号情報を決定する方法と同様に、得られた白縞の長さの内、最大の長さで最小の長さの中間の長さを閾値とし、符号情報を決定する。

3.6.4 バーコードマーカの識別

カメラ画像から抽出したバーコードマーカの符号情報と、あらかじめ登録してあるバーコードマーカの符号情報を比較し、カメラ画像から抽出したバーコードマーカが登録してあるどのバーコードマーカであるかを識別する。あらかじめプログラムには、バーコードマーカが貼られている現実空間上の3次元位置情報を各バーコードマーカにつき3点ずつ登録している。この3点は6つの特徴点を利用してバーコードマーカとカメラの位置・姿勢関係を算出する際に利用する。また、この3点はトラッキング精度が向上するように、一番左の黒縞、中心の黒縞、一番右の黒縞というようにできるだけバーコードマーカ内で広範囲に設定している。カメラ画像から抽出したバーコードマーカが登録してあるどのバーコードマーカであるか分かった場合は、バーコードマーカが実際に貼ってある現実空間上の3次元位置情報と、カメラ画像内での2次元位置情報を抽出する。

3.6.5 6つの特徴点を利用した位置・姿勢関係の算出

バーコードマーカとカメラの位置・姿勢関係の算出はP6P問題を解くことで行うため、同一平面上にないバーコードマーカの組を用いて行う必要がある。また、昨年度の研究の知見から、トラッキング精度を向上させるため、トラッキングに用いるバーコードマーカ間の距離はできるだけ離れている方が望ましいことが分かっている^[21]。そのため、カメラ画像からバーコードマーカを2つ以上抽出した場合、上記の2つの条件を満たすトラッキングに適したバーコードマーカの組み合わせを求める。上記の2つの条件を満たすバーコードマーカの組があれば、それぞれのバーコードマーカから3点ずつ、計6点の位置情報を用いP6P問題を解くことで各バーコードマーカとカメラの相対的な位置・姿勢関係を算出できる。なお、P6P問題の解法の詳細については付録Bにて説明する。

第 4 章 提案手法によるトラッキングの実験用システムの開発

本章では、第 3 章で説明したトラッキング手法をもとに開発した実験用システムのハードウェア構成とソフトウェア構成について述べる。

4.1 ハードウェア構成

表 4.1: ハードウェア

ハードウェア	製品名
CCD カメラ	WAT-240A
ノート PC	ThinkPad X31
ビデオキャプチャ	USB-CAP2

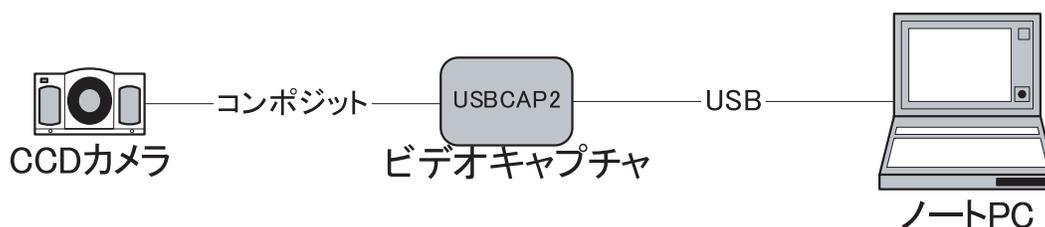


図 4.1: ハードウェア構成

実験用システムに用いたハードウェアを表 4.1 に、ハードウェアの構成図を図 4.1、および実験用システムの写真を図 4.2 に示す。

また、各ハードウェアの仕様を図 4.2、図 4.3、および図 4.4 示す。本研究で開発した実験用システムは、本研究で開発したバーコードマーカによるトラッキング手法の各種精度を確かめるために作成したものである。そのため、システムの形状は作業員がふげん発電所構内で装着することを考慮せずに作成した。また、放射線量情報の重畳表示も行っていない。



図 4.2: 実験用システムの写真

表 4.2: CCD カメラの仕様

総画素数 (pixel)	H524xV497
有効画素数 (pixel)	H512xV492
同期方式	Internal
信号出力	コンポジット
変換形式	AVI ファイル
逆光補正	on
ホワイトバランス	自動
電源電圧 (V)	+ 5.4 ~ 7.5
消費電流 (mA)	最大 160(DC + 6V)
動作温度 ()	- 10 ~ + 40
外形寸法 (mm)	W36.0xH30.0xD15.0
重量 (g)	30

表 4.3: ビデオキャプチャの仕様

フレームサイズ (pixel)	H320xV240
ケーブル長 (m)	1.5
電源電圧 (V)	DC5.0
消費電流 (mA)	300
外形寸法 (mm)	W15.1xH82xD31
重量 (g)	90

表 4.4: ノート PC の仕様

OS	Windows XP Professional
CPU(GHz)	Pentium M 1.4
メモリ (MB)	256
HDD(GB)	40
外形寸法 (mm)	W273xH223xD24.9
重量 (kg)	1.64

4.2 ソフトウェア構成

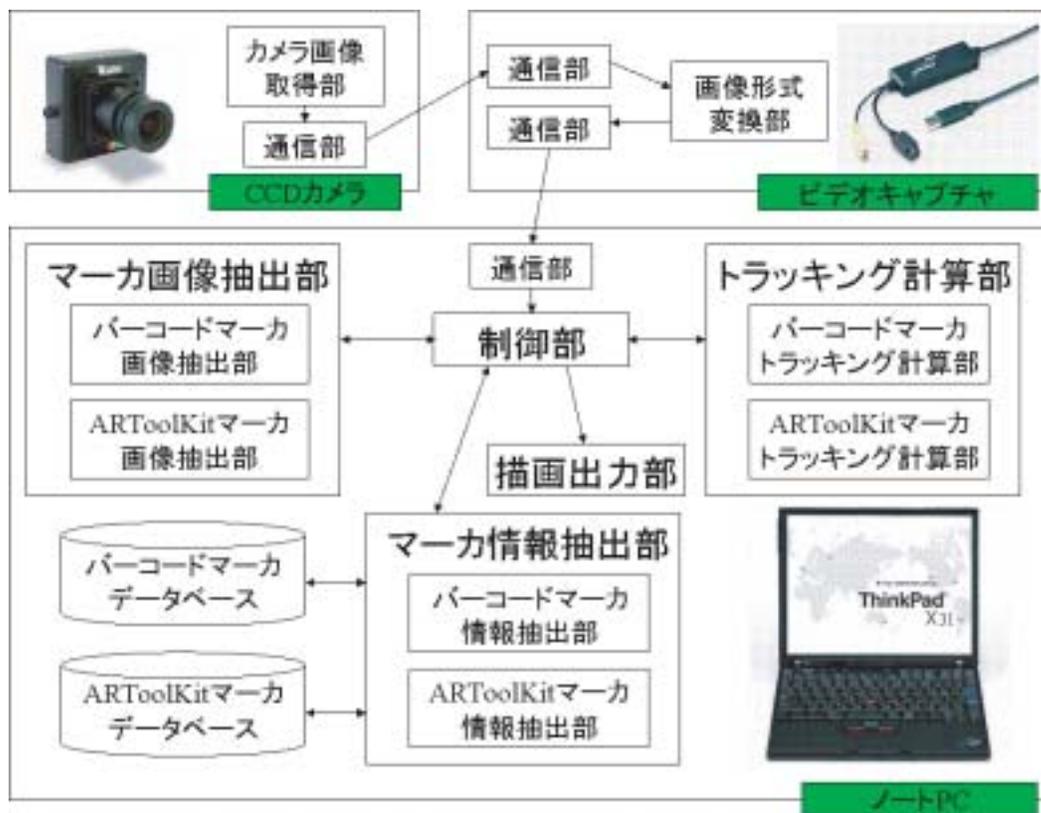


図 4.3: ソフトウェア構成

本研究で開発した実験用システムのソフトウェア構成を図 4.3 に示す。実験用システムでは、まず CCD カメラで撮影したカメラ画像をビデオキャプチャによって AVI 形式に変換する。そして、AVI 形式に変換したカメラ画像をノート PC に送信する。ノート PC に送られたカメラ画像は、マーカ画像抽出部によって ARToolKit マーカ、またはバーコードマーカが存在するか探索される。カメラ画像からいずれかの人工マーカを抽出できた場合、マーカ情報抽出部によって各データベースから人工マーカを貼り付けている現実空間中の 3 次元位置情報と、カメラ画像からカメラ画像中の 2 次元位置情報を抽出し、それぞれの情報を対応付ける。その後、トラッキング計算部によってカメラと人工マーカの相対的な位置・姿勢関係を計算する。得られた計算結果とカメラ画像を、描画出力部によってノート PC のディスプレイに表示させる。

本研究で開発したシステムは、Microsoft Windows 上で動作し、開発環境には Microsoft Visual C++ 6.0 を使用した。

第 5 章 トラッキング手法の評価実験

本章では、本研究で提案したトラッキング手法が 3.2 節で述べた要求仕様をどの程度満たしているか評価するために、4 章で説明した実験用システムを用いて以下の項目について評価実験を行う。

1. 遠距離にあるバーコードマーカをカメラ画像内から抽出、識別できるか
2. 照明環境を変化させた場合、遠距離にあるバーコードマーカをカメラ画像内から抽出、識別できるか
3. 遠距離にあるバーコードマーカを用いてトラッキングを行った際、どれほどのトラッキング精度を得られるのか
4. バーコードマーカはどういった間隔で環境に貼り付けると良いのか
5. バーコードマーカを用いてトラッキングを行った際、どれほどの処理速度になるか
6. ふげん発電所で実際に用いた場合はどういった結果が得られるのか

なお、本研究は遠距離に貼り付けてあるバーコードマーカを用いてトラッキングを行った場合のトラッキング精度を確認することが主目的である。そのため上記に示した 1 から 5 までの評価実験では、カメラ画像内のバーコードマーカが容易に抽出できる環境、つまりバーコードマーカ付近にバーコードマーカの抽出を妨げるような模様、いわゆるノイズが存在しない環境で行う。

また 6 の評価実験では、1 から 5 までの評価実験の結果が実際の原子力発電プラント内ではどのような結果となるか、またその結果から今後どのような研究をしていく必要があるか確かめるためふげん発電所内の環境で動作確認を行う。

上記に示した 1 の評価実験は 5.1 節、2 の評価実験は 5.2 節、3 および 4 の評価実験は 5.3 節、5 の評価実験は 5.4 節、および 6 の評価実験は 5.5 節で述べる。

5.1 バーコードマーカとカメラの距離と角度の変化に対するロバスト性評価実験

本研究では、遠距離からのトラッキングを実現するためにバーコードマーカを開発した。そのため、実際に遠距離に貼り付けたバーコードマーカをカメラ画像から抽出、

識別ができるか確かめる必要がある。そこで、以下のような評価実験を行う。

実験の目的

バーコードマーカとカメラの距離を変化させ、カメラ画像内からバーコードマーカを抽出、識別できる距離を評価する。またその際にバーコードマーカの撮影角度を変化させ、カメラ画像内からバーコードマーカを抽出、識別できる角度を評価する。

実験の方法と条件

表 5.1: 距離と角度の変化に対するロバスト性評価実験の条件

光源の種類	蛍光灯
光源の場所	天井
2 値化の閾値	130
バーコードマーカの符号情報	000100101
バーコードマーカの長さ (cm)	48
バーコードマーカ貼り付け位置における照度 (lux)	200
バーコードマーカとカメラ間の距離 (m)	0.5、1.0、2.0、3.0、 4.0、5.0、6.0
バーコードマーカの撮影角度 (°)	0、20、40、60、80

実験条件を表 5.1 に、実験方法を図 5.1 に示す。抽出を容易にするために白色の板に貼り付けた横向き of バーコードマーカと、バーコードマーカを撮影するカメラを図 5.1 に示すように、バーコードマーカの中央の黒縞がカメラ画像の中心に写るように正面に設置した。そして、カメラをバーコードマーカに近づけることでその距離を 0.5m から 6.0m まで変化させ、それぞれの場合においてバーコードマーカを抽出、識別できるか調べた。

またそれぞれの距離において、バーコードマーカを貼り付けてある板をバーコードマーカの中央の黒縞を通る縦軸を中心に、20°から 80°まで回転させ、それぞれの場合において、バーコードマーカを抽出、識別できるか調べた。

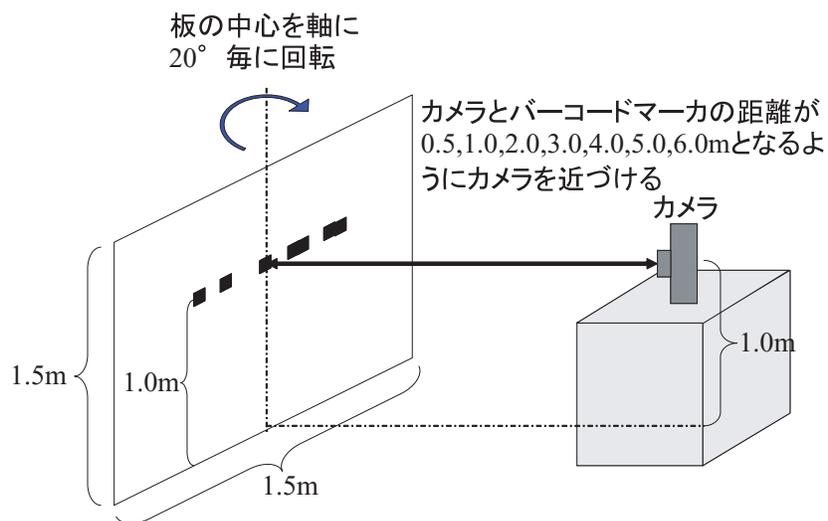


図 5.1: 距離と角度の変化に対するロバスト性評価実験の方法

表 5.2: 距離と角度の変化に対するロバスト性評価実験の結果

距離 (m) \ 角度 (°)	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
0	×						
20	×						
40	×	×					
60	×	×				×	×
80	×	×		×	×	×	×

実験結果

実験結果を表 5.2 に示す。表 5.2 の実験結果はバーコードマーカの認識の程度を ○、△、× の 3 段階に分けている。○ はバーコードマーカをカメラ画像から抽出でき、なおかつ正しく符号情報を抽出できた、つまり正確な識別ができた状態を示す。△ はバーコードマーカをカメラ画像から抽出できたが、正しく符号情報を抽出できなかった状態を示す。× はバーコードマーカをカメラ画像から抽出することもできなかった状態を示す。なお、角度 0° で距離 0.5m から 6.0m までの実験時の 2 値画像を図 5.2 から図 5.8 に、また角度 60° で距離 1.0m、3.0m、および 5.0m の実験時の 2 値画像を図 5.9、図 5.10、および図 5.11 に示す。

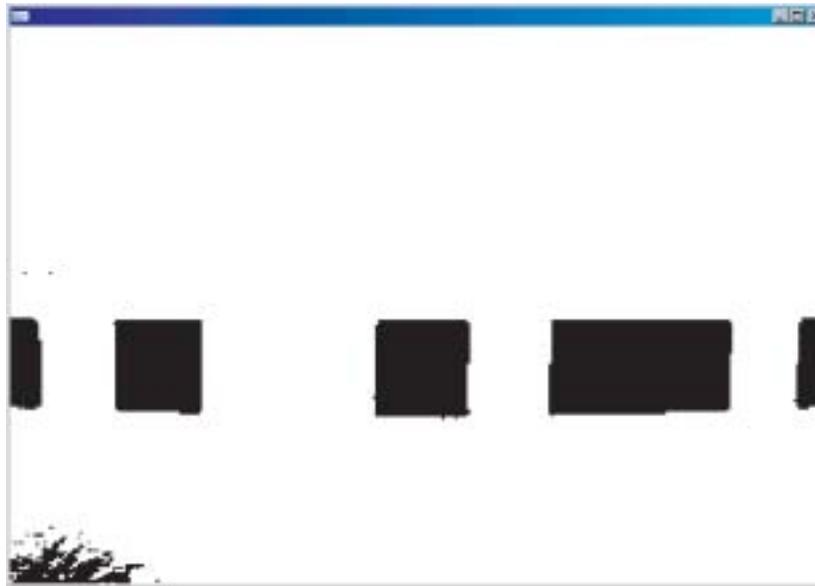


図 5.2: 距離 0.5m、角度 0° で撮影したバーコードマーカの 2 値画像

考察

本研究で開発したバーコードマーカは正面から撮影した場合、カメラとの距離が 1.0m から 5.0m まで正しく識別できることが分かった。

カメラとの距離が 1.0m より近い場合では、図 5.2 に示すように、バーコードマーカがカメラ画像内に入りきらないため認識できないことが分かった。

カメラとの距離が 1.0m の場合では、図 5.3 に示すように、バーコードマーカを識別することができたが、実際のトラッキングには 2 つ以上のバーコードマーカをカメラ

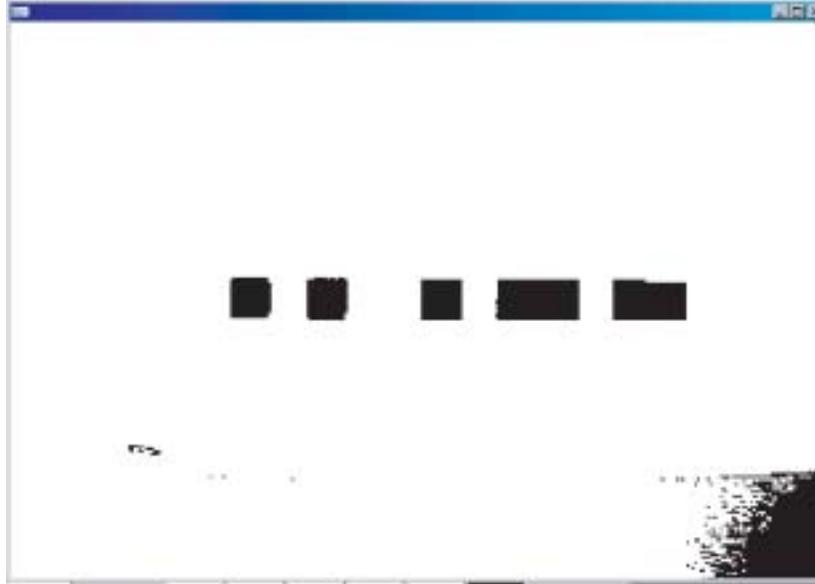


図 5.3: 距離 1.0m、角度 0 °で撮影したバーコードマーカの 2 値画像

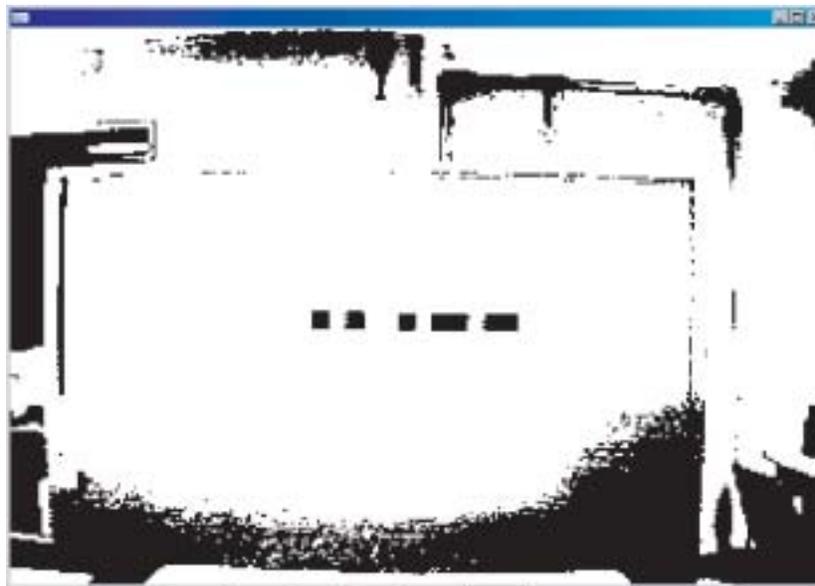


図 5.4: 距離 2.0m、角度 0 °で撮影したバーコードマーカの 2 値画像



図 5.5: 距離 3.0m、角度 0 °で撮影したバーコードマーカの2値画像



図 5.6: 距離 4.0m、角度 0 °で撮影したバーコードマーカの2値画像



図 5.7: 距離 5.0m、角度 0 °で撮影したバーコードマーカの 2 値画像



図 5.8: 距離 6.0m、角度 0 °で撮影したバーコードマーカの 2 値画像

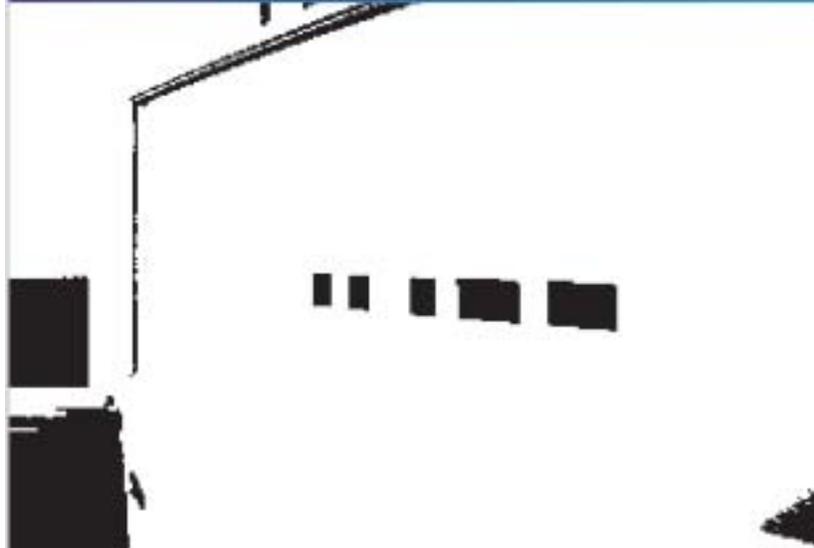


図 5.9: 距離 1.0m、角度 60 °で撮影したバーコードマーカの 2 値画像



図 5.10: 距離 3.0m、角度 60 °で撮影したバーコードマーカの 2 値画像



図 5.11: 距離 5.0m、角度 60 °で撮影したバーコードマーカの 2 値画像

に捉える必要がある。そのため、カメラとの距離が 1.0m の場合では、バーコードマーカを 2 つ以上同時に撮影することは困難である。また、カメラとの距離が 1.0m の距離なら、小さな ARToolKit マーカを用いてトラッキングを行うことが可能なので、バーコードマーカをカメラとの距離が 1.0m の場所からトラッキングに用いる必要はない。カメラとの距離が近距離の場合にバーコードマーカを 2 つ以上カメラに捉えるための解決策としては、撮影するカメラの数を増やす方法が考えられる。そうすることにより、バーコードマーカをカメラに捉える可能性が高まる。

また、カメラとの距離が 6.0m の場合では、図 5.8 に示すように、バーコードマーカがかなり小さく撮影されている。そのため、量子化誤差の影響によりバーコードマーカの黒縞の大きさが大きく変動し、黒縞の重心、面積が大きく変動した。そのため、バーコードマーカを抽出できたが符号情報を正しく抽出できず、識別できなかったと考えられる。

角度の変化に対しては、カメラとの距離が 2.0m から 4.0m の場合、最大で 60 °まで正しく識別することができた。

バーコードマーカを斜めから撮影すると、図 5.9 に示すように、手前に写る黒縞は大きく、奥に写る黒縞は小さく撮影される。その結果、黒縞の符号情報を決定する際に、本来「0」の符号情報を大きく写ったため「1」の符号情報と判定してしまう、またその逆に本来「1」の符号情報を小さく写ったため「0」の符号情報と判定してしまう場

合があった。さらには、黒縞が大きく写りすぎたため、ARToolKit マーカのシルエットとして扱われ、バーコードマーカの黒縞のシルエットとしての候補から除外される場合もあった。60°以上の角度ではこの影響が大きいためそれぞれの縞が持つ符号情報を抽出し間違えたり、バーコードマーカとして抽出できなくなったと考えられる。

また、カメラとの距離が1.0mの場合では、図5.9に示すように距離が近いために手前に写る黒縞は大きく、奥に写る黒縞は小さく写る影響が大きい。そのため、20°までしか正しく識別できなかったと考えられる。

また、カメラとの距離が5.0mの場合では、図5.11に示すように、カメラとの距離が遠いため、奥に写る黒縞の大きさはかなり小さく写る。そのため量子化誤差の影響が大きく、黒縞の重心位置、大きさの変動が顕著になった。そのため40°までしか正しく識別できなかったと考えられる。

5.2 バーコードマーカとカメラの距離と明るさの変化に対するロバスト性評価実験

ふげん発電所構内の大部分の場所は薄暗く、300lux弱程度の明るさである。しかし、ふげん発電所構内の天井は高低差が激しく、天井が低い場所では、照明が解体機器の近くに存在し、部分的にはかなり明るい場所も存在する。一般的に、紙で作られた人工マーカは光の反射により白く写り、正しく認識できない場合があることが知られている。そのため、以下のような実験を行う。

実験の目的

フェルトをバーコードマーカの素材として用いることによって光の反射の影響をどれだけ排除できるか評価する。また、バーコードマーカとカメラの距離の変化によって光の反射の影響がどうなるか評価する。

実験の条件と方法

実験条件を表5.3に、実験方法を図5.12に示す。レーザープリンタを用いて紙に印刷したバーコードマーカと、フェルトを素材としたバーコードマーカとカメラの位置を図5.12に示すように、各バーコードマーカの中央の黒縞がカメラ画像の中心に写るように正面に設置した。各バーコードマーカは抽出を容易にするために白色の板に貼り付けた。また、蛍光灯は5.12に示すように、バーコードマーカの左右斜め前方に設置し

表 5.3: 距離と明るさの変化に対するロバスト性評価実験の条件

光源の種類	蛍光灯
光源の場所	天井、 バーコードマーカの左右
2 値化の閾値	130
バーコードマーカの符号情報	000100101
バーコードマーカの長さ (cm)	48
バーコードマーカとカメラの距離 (m)	2、3、4、5
バーコードマーカ貼り付け位置における照度 (lux)	均一 100、550、700、1000 偏り 700 ~ 300、1200 ~ 250

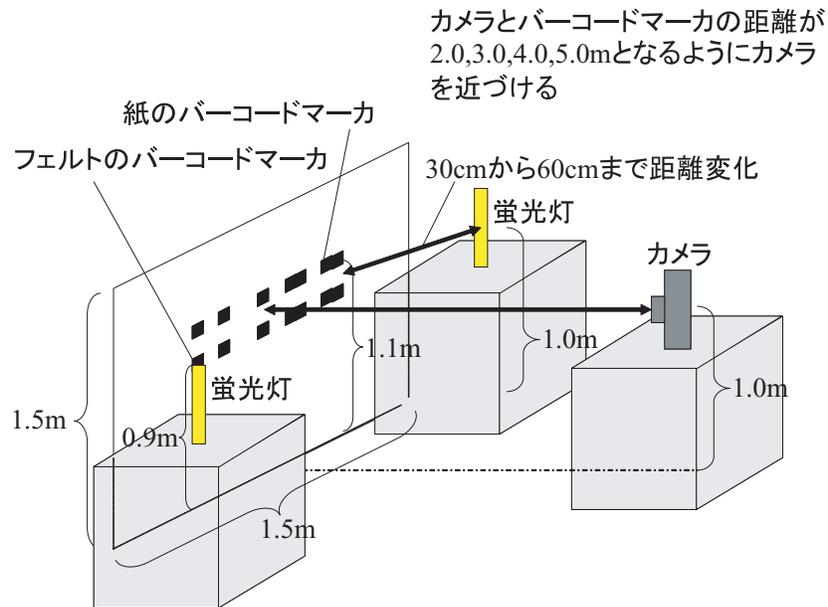


図 5.12: 距離と明るさの変化に対するロバスト性評価実験の方法

た。そして、カメラをバーコードマーカに近づけることでその距離を 2.0m から 5.0m まで変化させ、それぞれの場合において、以下のような照明環境の下、照度を変化させてバーコードマーカが正しい形状でカメラに写るか調べた。照明環境は以下の 2 通りである。

1. バーコードマーカ貼り付け位置における照度が均一になるように照明を当てる
2. バーコードマーカ貼り付け位置における照度が片側だけ強くなるように照明を当てる

1 の照明環境とは、バーコードマーカの左右から照明を当てて、バーコードマーカ全体を均一に条件の照度で照明を当てることを示し、表 5.3 中では、バーコードマーカ貼り付け位置における照度を「均一」と表現している。また、2 の照明環境とは、バーコードマーカ向かって左側からのみ照明を当てて、バーコードマーカに入射する光の照度に偏りを持たせていることを示し、表 5.3 中では、バーコードマーカ貼り付け位置における照度を「偏り」と表現している。

バーコードマーカ貼り付け位置における照度の調節は、バーコードマーカと蛍光灯の距離を変化させることで行った。バーコードマーカと蛍光灯の距離は最も近づけた場合で 30cm 程度、最も遠ざけた場合で 60cm 程度であった。

なお、バーコードマーカに入射する光の入射角と同じ角度で反射する反射角の反射光がカメラに入射する最も明るい光であると考えられる。そのため、蛍光灯の反射光を捉えた際のカメラ画像は黒い部分も白く写りやすいと考えられる。その際のバーコードマーカ画像を評価する必要があると考えられるが、バーコードマーカは細長い形状をしているため、1 つの光源に対する 5 つの黒縞からの反射光の反射角はそれぞれ異なる。そのため、すべての反射光を捉えて評価することは難しい。そこで、本研究では反射光の影響を考慮せずに実験を行った。また、人工マーカの印刷には、RICOH 製モノクロレーザープリンタ IPSioNX850RPCS を用いた。

実験結果

実験結果を表 5.4、および表 5.5 に示す。表中の距離とは、バーコードマーカとカメラの距離である。また、実験結果はバーコードマーカの形状の程度を \times の 2 種類としている。 \times とは照明の影響がなく正常なバーコードマーカの形状として抽出できている状態を示す。また、 \times とは照明が明るいためにバーコードマーカの黒縞がカメ

表 5.4: 紙のバーコードマーカを用いた場合での距離と明るさの変化に対するロバスト性評価実験の結果

距離 (m) \ 照度 (lux)	2	3	4	5
均一 100				
均一 550			×	
均一 700				
均一 1000	×	×	×	
偏り 700 ~ 300	×	×		
偏り 1200 ~ 250	×	×	×	

表 5.5: フェルトのバーコードマーカを用いた場合での距離と明るさの変化に対するロバスト性評価実験の結果

距離 (m) \ 照度 (lux)	2	3	4	5
均一 100				
均一 550				
均一 700				
均一 1000		×		
偏り 700 ~ 300				
偏り 1200 ~ 250	×			



図 5.13: 距離 2.0m、照度均一 1000lux で撮影したバーコードマーカの 2 値画像



図 5.14: 距離 3.0m、照度均一 1000lux で撮影したバーコードマーカの 2 値画像

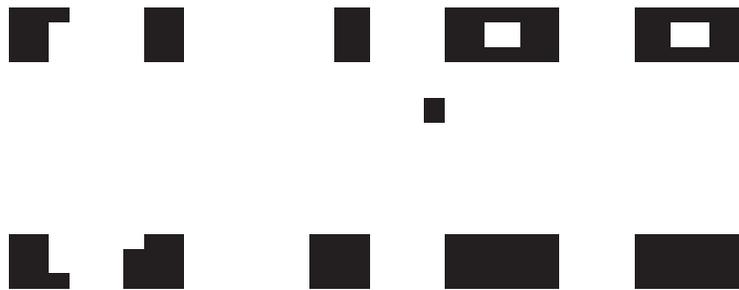


図 5.15: 距離 4.0m、照度均一 1000lux で撮影したバーコードマーカの 2 値画像



図 5.16: 距離 5.0m、照度均一 1000lux で撮影したバーコードマーカの 2 値画像

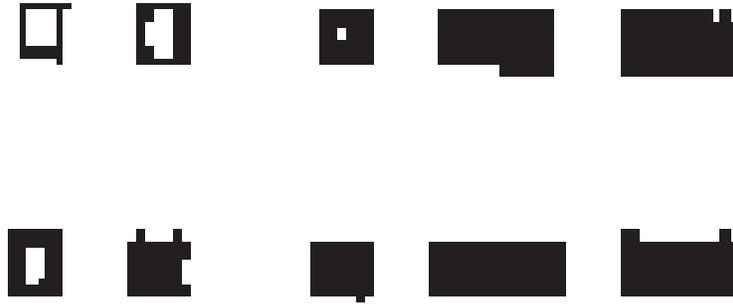


図 5.17: 距離 2.0m、照度 1200 ~ 250lux で撮影したバーコードマーカの 2 値画像



図 5.18: 距離 3.0m、照度 1200 ~ 250lux で撮影したバーコードマーカの 2 値画像

ラ画像内では白みを帯び、2値化した場合に白と判定され、バーコードマーカの黒縞の一部が劣化した形状になっている状態を示す。

なお、それぞれの条件でのカメラ画像中のバーコードマーカの2値画像の拡大図を図5.13から図5.18に示す。各図の上側のバーコードマーカが紙によるバーコードマーカ、各図の下側のバーコードマーカがフェルトによるバーコードマーカである。

考察

均一な照明条件でも、偏りのある照明条件でもフェルトのバーコードマーカの方が正しい形状でバーコードマーカを撮影できた。フェルトが反射光を分散させ、黒縞部分がカメラ画像内で白く写らないようになったためであると考えられる。

また、全体的にカメラとバーコードマーカの距離が遠いほど、バーコードマーカの形状が劣化しなかった。これは、距離が遠いほど反射光の影響が少ないためであると考えられる。

照明条件が均一な場合と偏りがある場合で同じ照度の黒縞部分を比べた場合、照明条件に偏りがある方がバーコードマーカの形状が劣化しやすいことが分かった。本研究で用いたカメラには採光を自動で調節する機能が付いているため、暗い場所で撮影した場合には、カメラは自動的に多くの光を取り込むことで画像を明るくし、また反対に、明るい場所ではカメラは自動的に取り込む光の量を少なくして画像を暗くする。そうしてカメラ画像の明るさを均一にしている。そのため、照明条件が均一な場合では、照度が強い場合でもカメラが自動的にカメラに取り込まれる光を絞り、バーコードマーカの黒縞が白く写らなかった。しかし、照明条件に偏りがある場合では、そういった調節がうまく機能せず、バーコードマーカの黒縞が白く写りやすくなったと考えられる。

5.3 バーコードマーカ間の距離の変化に対するロバスト性 評価実験

昨年の本研究室での研究の知見から、カメラ画像内のトラッキングに用いる特徴点同士の距離が短い場合、特に20pixel以下の場合、トラッキング精度が急激に悪くなるということが分かっている^[21]。そのため、トラッキングに用いる特徴点はカメラ画像内で広範囲に広がっていることが望ましい。

しかしながら、バーコードマーカによるトラッキング手法では、それぞれのバーコー

ドマーカに3点ずつ特徴点を設定している。そのため、トラッキングに用いる6つの特徴点のうち3点ずつ、近隣に存在してしまうことになる。これにより、トラッキング精度が損なわれる恐れがある。特に、バーコードマーカは遠距離から撮影するので、バーコードマーカが遠距離になるほど、カメラ画像内におけるバーコードマーカ内の特徴点同士の距離が近づき、トラッキングの計算誤差が大きくなる可能性がある。

また、バーコードマーカ内の特徴点をカメラ画像内で広範囲に広がらせるためには、バーコードマーカ間の距離を広げる必要がある。ただし、バーコードマーカ間の距離を広げすぎると、バーコードマーカを2つ同時に撮影することが困難になる。そのため妥当なバーコードマーカ間の距離を知る必要がある。そこで、以下の2点について評価する。

1. バーコードマーカ間の奥行き方向の距離の変化に対するトラッキング精度
2. バーコードマーカ間の横方向の距離の変化に対するトラッキング精度

5.3.1 バーコードマーカ間の奥行き方向の距離の変化に対するロバスト性評価実験

実験の目的

バーコードマーカ間の距離を奥行き方向に変化させることによってトラッキング精度がどのように変化するか評価する。

実験の方法と条件

本研究でのトラッキング手法では、回転行列を用いて位置・姿勢関係の算出を行っている。この回転行列の計算において位置・姿勢関係の算出結果は大きな誤差を伴う。そのため、再度画像情報を利用し回転行列の修正を行っている。回転行列の修正には、トラッキングに用いた2つのバーコードマーカのうち、どちらか一方のバーコードマーカの位置情報を用いて行う。そのため、修正に利用するバーコードマーカによってトラッキングの修正結果が大きく変わる場合があると考えられる。本実験では、この特性を利用し、2つのバーコードマーカを用いてトラッキングを行い、それぞれのバーコードマーカを回転行列の修正に用いて、トラッキング結果を比較した。

実験条件を表 5.6 に、実験方法を図 5.19 に示す。なお以下、カメラ画像横方向を x 軸、カメラ画像縦方向を y 軸、奥行き方向を z 軸とする。トラッキングに用いる2つのバーコードマーカとカメラを図 5.19 に示すように、カメラとバーコードマーカの距

表 5.6: 奥行き方向の距離の変化に対するロバスト性評価実験の条件

光源の種類	蛍光灯
光源の場所	天井
バーコードマーカの符号情報	000000011、 000100101
2 値化の閾値	130
距離 5.0m のバーコードマーカ貼り付け位置における照度 (lux)	260
距離 4.0m のバーコードマーカ貼り付け位置における照度 (lux)	390
距離 3.0m のバーコードマーカ貼り付け位置における照度 (lux)	120
トラッキングに用いたバーコードマーカの組	3.0m と 4.0m、 3.0m と 5.0m、 4.0m と 5.0m

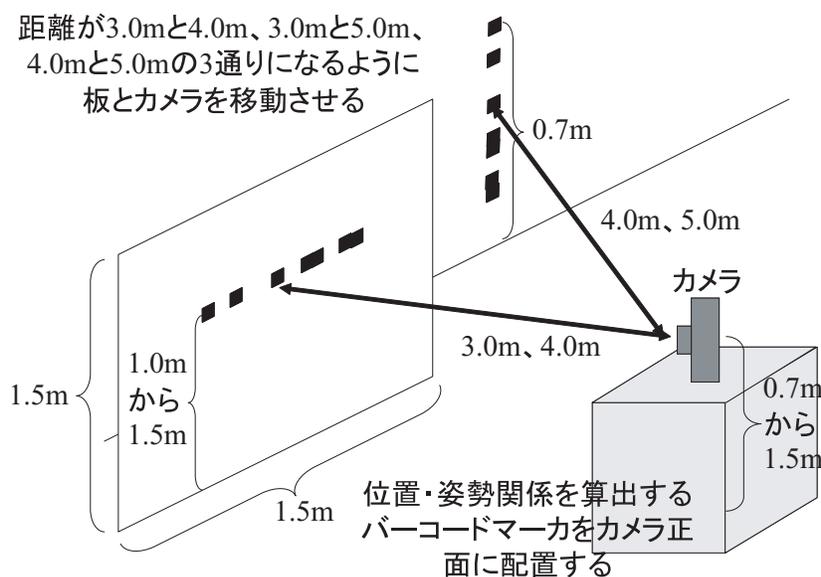


図 5.19: 奥行き方向の距離の変化に対するロバスト性評価実験の方法

離が3.0mと4.0m、3.0mと5.0m、および4.0mと5.0mとなるように設置した。各バーコードマーカは抽出を容易にするために白色の板、および白地の壁に貼り付けた。なおその際には、回転行列の修正に用いるバーコードマーカがカメラ画像の中心に写るように設置し、カメラ画像内で常に2つのバーコードマーカ中央の黒縞間の距離がx軸方向100pixel、y軸方向50pixelになるように設置した。そして、各条件においてトラッキング精度を計測した。トラッキング結果はそれぞれの条件において100回ずつ計測し、その平均を求めた。

実験結果

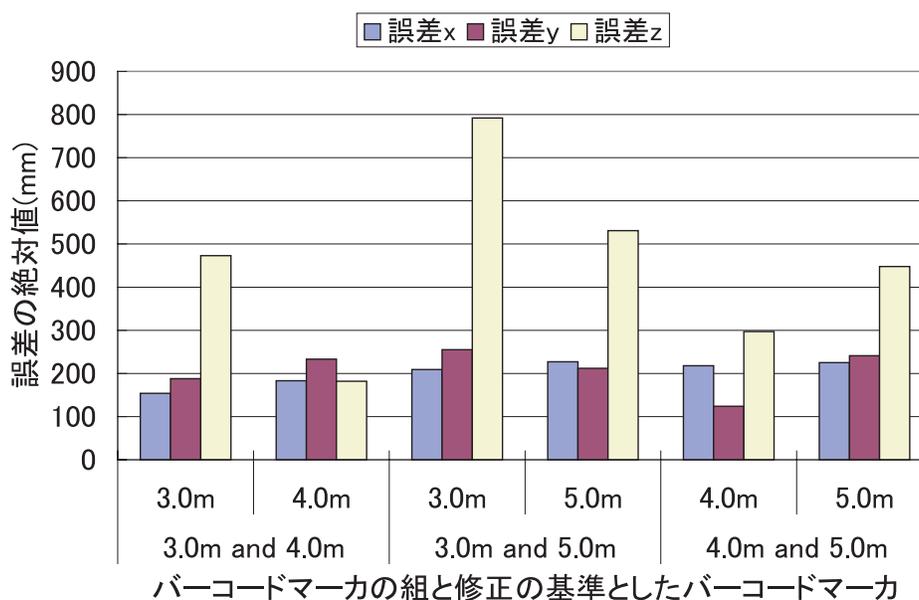


図 5.20: 奥行き方向の距離の変化に対するロバスト性評価実験の結果

実験結果を図 5.20 に示す。図 5.20 の誤差とは、トラッキング計算結果によるカメラからバーコードマーカまでの各座標軸方向 (x、y、z) の距離から、メジャーで計測したカメラからバーコードマーカまでの各座標軸方向の距離を差し引いた値の絶対値である。

また2つのバーコードマーカの内、距離が遠いバーコードマーカを基準として修正を行った場合での2値画像を図 5.21 から図 5.23 に示す。

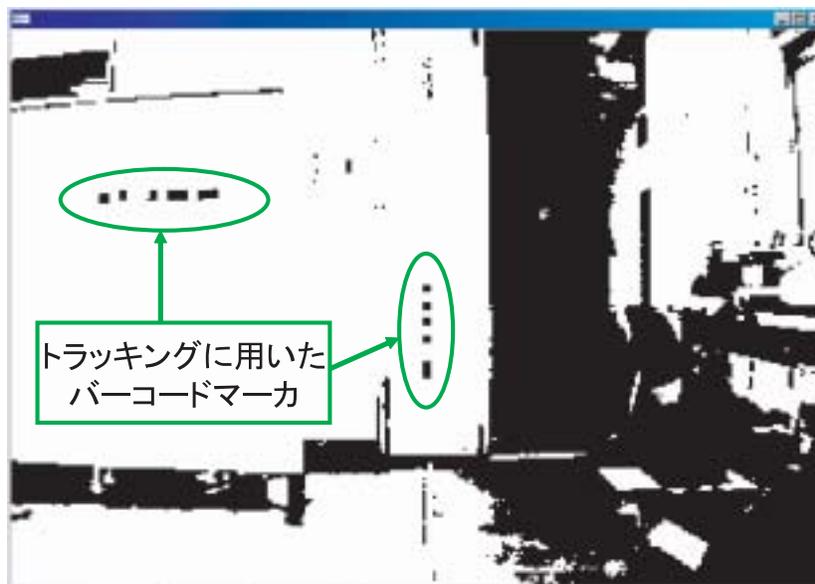


図 5.21: 距離 4.0m のバーコードマーカを基準に修正を行った距離 4.0m と距離 3.0m のバーコードマーカの 2 値画像

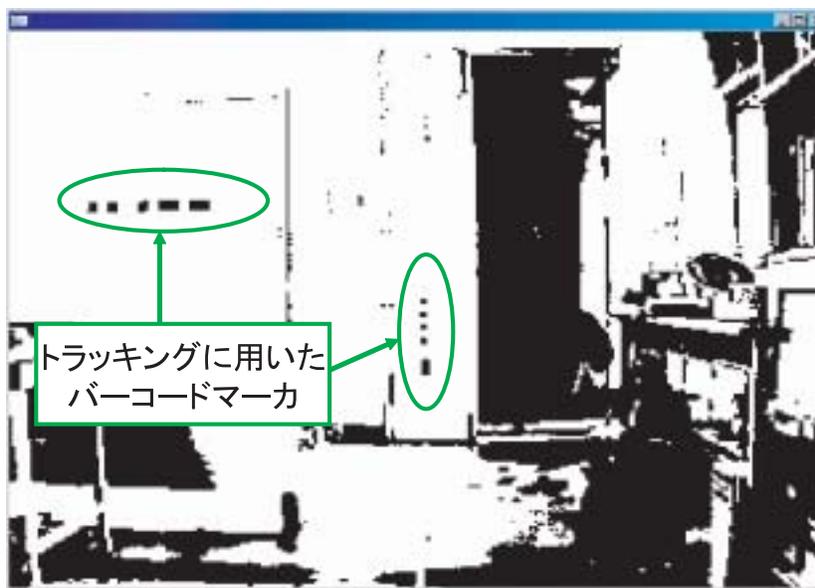


図 5.22: 距離 5.0m のバーコードマーカを基準に修正を行った距離 5.0m と距離 3.0m のバーコードマーカの 2 値画像

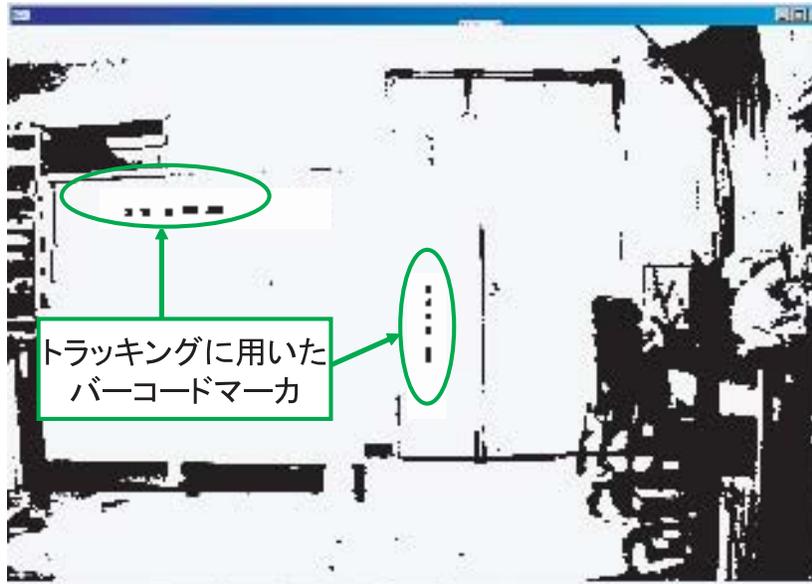


図 5.23: 距離 5.0m のバーコードマーカを基準に修正を行った距離 5.0m と距離 4.0m のバーコードマーカの 2 値画像

考察

どのバーコードマーカの組み合わせについてもトラッキング精度に大差はなかった。x 座標値、y 座標値については、どのバーコードマーカの組み合わせでもトラッキング精度が良かった。しかし、z 座標値についてはトラッキング結果が実際の距離よりも非常に遠い距離を算出する場合があった。これは、重畳情報を表示させる際、重畳情報は正しい位置に表示されるが、奥行きに関しては間違っていることを意味する。

このように z 座標値のみトラッキング精度が悪い原因を考察する。例えば、バーコードマーカをカメラ画像内における x 軸方向、または y 軸方向に 1m 動かした場合、カメラ画像内で数 10pixel の変化として現れる。しかし、バーコードマーカを z 軸方向に 1m 動かした場合、カメラ画像内では数 pixel の変化としてしか表れない。これは、1pixel あたりに含まれる誤差が x 軸成分・y 軸成分に比べ、z 軸成分の方が大きくなることを意味しており、z 座標値に大きく誤差が生じる原因と考えられる。

また、カメラから 3.0m 離れた位置にあるバーコードマーカの特徴点間の距離は 9pixel、カメラから 5.0m 離れた位置にあるバーコードマーカの特徴点間の距離は 5pixel であった。こういったこともトラッキング精度の悪化につながっていると考えられる。

5.3.2 バーコードマーカ間の横方向の距離の変化に対するロバスト性 評価実験

実験の目的

バーコードマーカ間の距離を横方向に変化させることによってトラッキング精度がどのように変化するか評価する。

実験の方法と条件

表 5.7: 横方向の距離の変化に対するロバスト性評価実験の条件

光源の種類	蛍光灯
光源の場所	天井
2 値化の閾値	130
バーコードマーカの符号情報	000000011、 000100101
距離 5.0m のバーコードマーカ貼り付け位置における照度 (lux)	260
距離 3.0m のバーコードマーカ貼り付け位置における照度 (lux)	120
バーコードマーカ間の縦方向の画像上の距離 (pixel)	50
バーコードマーカ間の横方向の画像上の距離 (pixel)	50、100、 150、200

実験条件を表 5.7 に、実験方法を図 5.24 に示す。トラッキングに用いる 2 つのバーコードマーカとカメラを図 5.24 に示すように、カメラとバーコードマーカの距離が 3.0m と 5.0m になるように設置した。

なおその際には表 5.7 に示すように、カメラ画像内での 2 つのバーコードマーカ中央の黒縞間の距離が x 軸方向で 50pixel、y 軸方向で 50pixel から 200pixel になるように設置した。カメラ画像上の 50pixel という距離は実際の環境上で 50cm 前後に相当する。また、2 つのバーコードマーカの中央がカメラ画像の中央に写るように設置した。さらに、トラッキング結果の修正の際に用いるバーコードマーカはカメラからの距離 3.0m のバーコードマーカとした。各バーコードマーカは抽出を容易にするために白色の板、および白地の壁に貼り付けた。そして、それぞれの条件においてトラッキング精度を

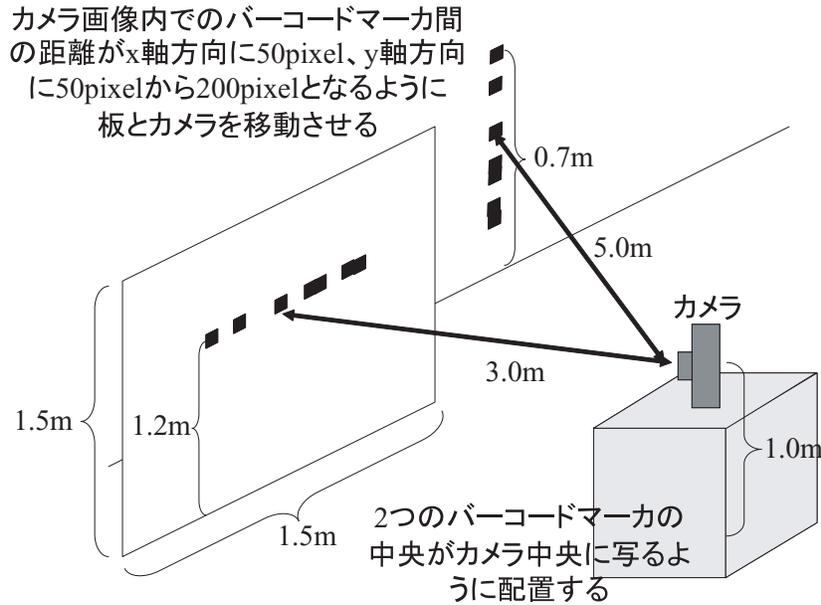


図 5.24: 横方向の距離の変化に対するロバスト性評価実験の方法

計測した。トラッキング結果はそれぞれの条件において 100 回ずつ計測し、その平均を求めた。

実験結果

実験結果を図 5.25 に示す。図 5.25 の誤差とは、トラッキング計算結果によるカメラからバーコードマーカまでの各座標軸方向 (x、y、z) の距離から、メジャーで計測したカメラからバーコードマーカまでの各座標軸方向の距離を差し引いた値である。

また、それぞれの条件で撮影した 2 値画像を図 5.26 から図 5.29 に示す。

考察

バーコードマーカ間の距離が近いとトラッキング精度が悪く、バーコードマーカ間の距離が遠いと、トラッキング精度が良いという結果が得られた。ただし、バーコードマーカ間の距離が遠いほど、2つのバーコードマーカをカメラ画像内に捉えることが困難になることを考慮すると、バーコードマーカ間の距離はカメラ画像内で 150pixel 程度がトラッキング精度も良く、妥当であると言える。150pixel 程度とは約 1.5m に相当する。

バーコードマーカ間の距離が近い場合、z 軸方向の誤差が大きくなる。つまりこれは、奥行きに関するトラッキング精度が著しく悪化していることを意味する。この原

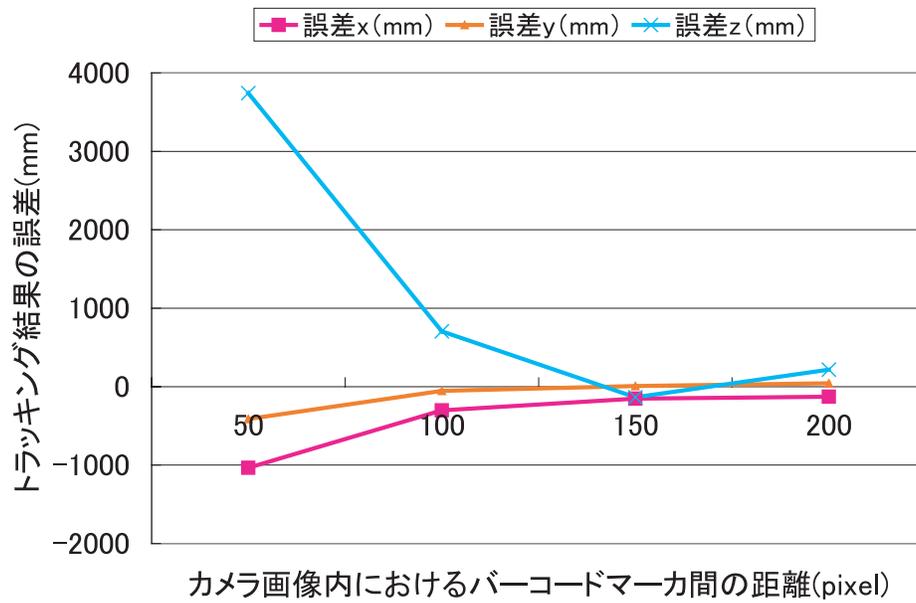


図 5.25: 横方向の距離の変化に対するロバスト性評価実験の結果

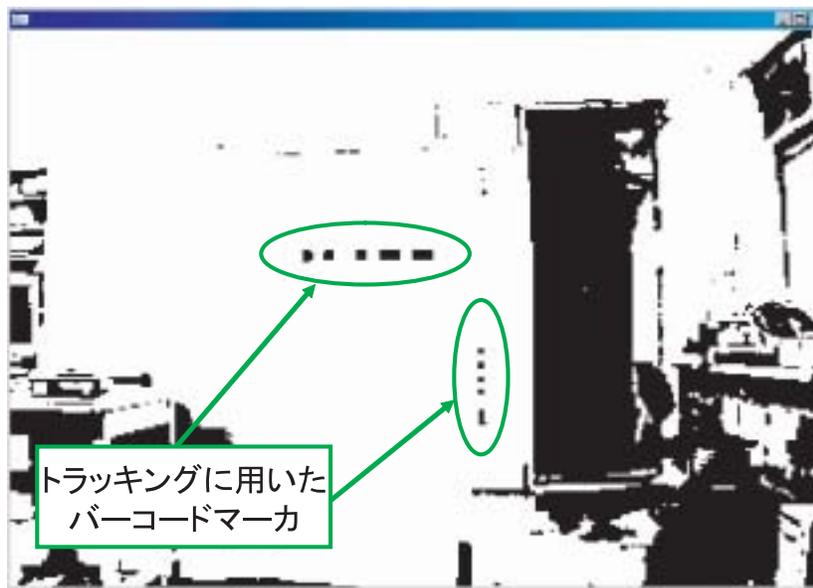


図 5.26: バーコードマーカ間の横方向の距離 50pixel で撮影したバーコードマーカ



図 5.27: バーコードマーカ間の横方向の距離 100pixel で撮影したバーコードマーカ



図 5.28: バーコードマーカ間の横方向の距離 150pixel で撮影したバーコードマーカ

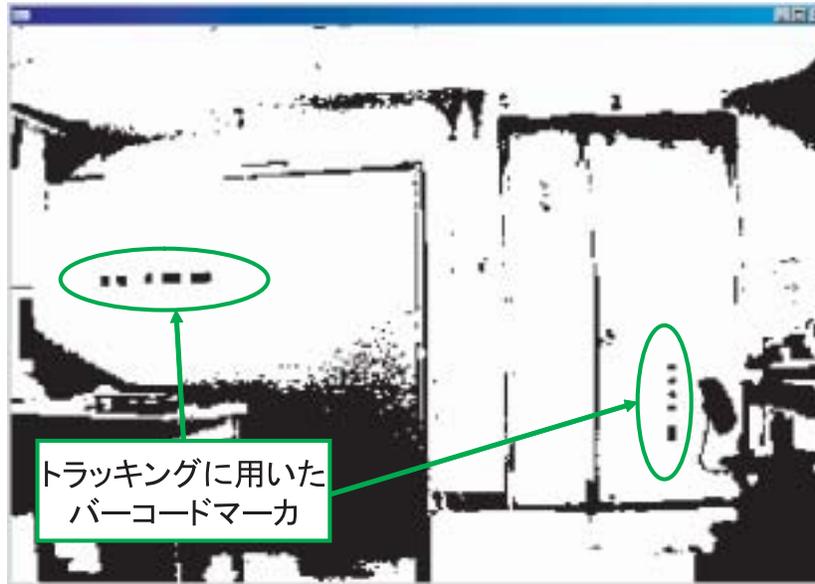


図 5.29: バーコードマーカ間の横方向の距離 200pixel で撮影したバーコードマーカ

因は、前項の実験の考察で述べたように、1pixel あたりに含まれる誤差が x 軸成分・ y 軸成分に比べ、 z 軸成分の方が大きくなるためであると考えられる。

5.4 動作速度評価実験

本研究でのトラッキング手法は原子力発電プラント内での放射線量の可視化を目的としているため、トラッキング精度が高いことも重要であるが、トラッキング処理がリアルタイムに実行できることも必要である。

本研究室での昨年度の研究の結果、カメラ画像内から 6 つの特徴点を抽出する処理から人工マーカとカメラの位置・姿勢関係を算出する処理までに要した時間は 10ms 程度であり、本研究で用いている P6P 問題の解法によるトラッキング手法が実用上問題ない処理速度で実行できることが分かっている^[21]。昨年度のシステムとの違いは、本研究で開発したバーコードマーカによるトラッキング手法では、トラッキングに用いる 6 つの特徴点をバーコードマーカ上に設定している点である。

本研究で開発した実験用システムを実行させた場合の 1 フレーム内の処理時間の大部分は、バーコードマーカを抽出する処理時間と位置・姿勢関係を算出する処理時間である。この合計の処理時間が 100ms 以内であれば毎秒 10 フレームの更新速度を実現できると言える。バーコードマーカをカメラ画像内から抽出するには、カメラ画像内の

すべての小連結成分に対して処理を行う必要があるため、各フレームごとのカメラ画像内の小連結成分の数により処理時間が大幅に変動する可能性がある。一方、カメラとバーコードマーカの位置・姿勢関係を算出する処理時間は、各フレームごとにバーコードマーカの位置情報が異なるだけで処理量が同じであるのでほぼ一定になる。

以上に述べた知見から、本研究で開発したバーコードマーカの抽出方法がリアルタイム性において有効であるか評価するため、以下のような実験を行う。

実験の目的

本研究で開発した実験用システムがリアルタイムに動作するか評価する。

実験の条件と方法

表 5.8: 動作速度評価実験の条件

光源の種類	蛍光灯
光源の場所	天井
カメラ画像内のバーコードマーカの数 (個)	2
バーコードマーカの符号情報	000000011、 000100101
2 値化の閾値	130
距離 4.0m のバーコードマーカ貼り付け位置における照度 (lux)	390
距離 3.0m のバーコードマーカ貼り付け位置における照度 (lux)	120
カメラ画像の種類	静止画
カメラ画像内の小連結成分の数 (個)	20、30、40、 50、60、70、 80、90、100

実験条件を表 5.8 に示す。バーコードマーカを 2 つ捉えた静止画のカメラ画像に対して本研究で開発した実験用システムを実行した。その際、バーコードマーカの黒縞の候補となる小連結成分の数をバーコードマーカの画像の一部をカメラ画像に貼り付けることで 20 から 100 個まで変動させてバーコードマーカの抽出に要した時間を 100 回繰り返し計測し平均を求めた。なお、どの条件においてもカメラ画像内の 2 つのバー

コードマーカを正しく抽出できるようにした。静止画のカメラ画像を用いて実験を行ったのは、カメラ画像中の小連結成分の数を固定させるためである。

さらに、バーコードマーカとカメラの位置・姿勢関係の算出に要した時間についても 100 回繰り返し計測し平均を求めた。

なお、人が違和感を感じないとされている毎秒 10 フレームの更新速度をリアルタイムの限界条件とした。

実験結果

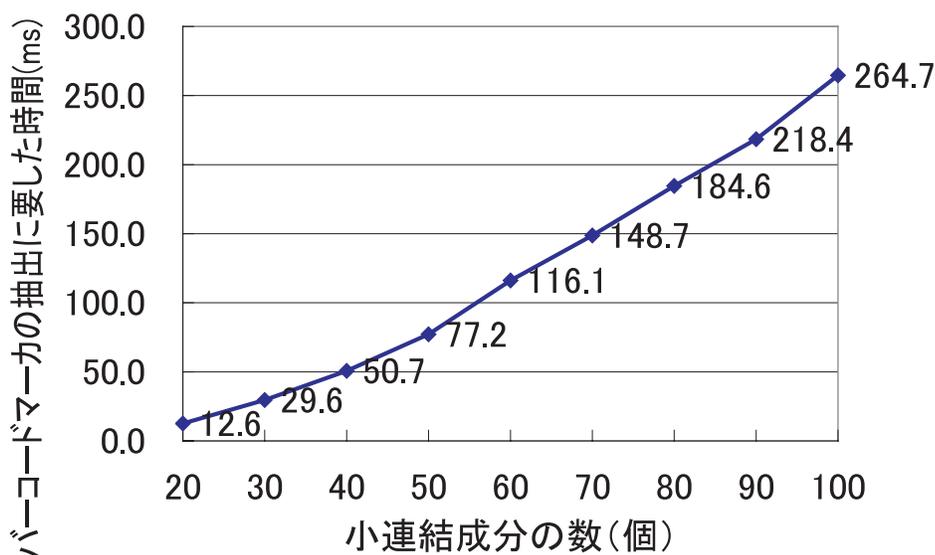


図 5.30: バーコードマーカの抽出に要した時間

バーコードマーカの抽出に要した時間の計測結果を図 5.30 に示す。また、位置・姿勢関係の算出に要した時間は、17.9ms であった。図 5.30 の実験結果に位置・姿勢関係の算出に要した時間を足し合わせたものを図 5.31 に示す。

考察

バーコードマーカの抽出に要した時間と、位置・姿勢関係の算出に要した時間の合計が 100ms 以内の場合、リアルタイムに動作していると言える。図 5.30 が示すように、カメラ画像内の小連結成分の数が増加するにつれて処理時間も増加していることが分

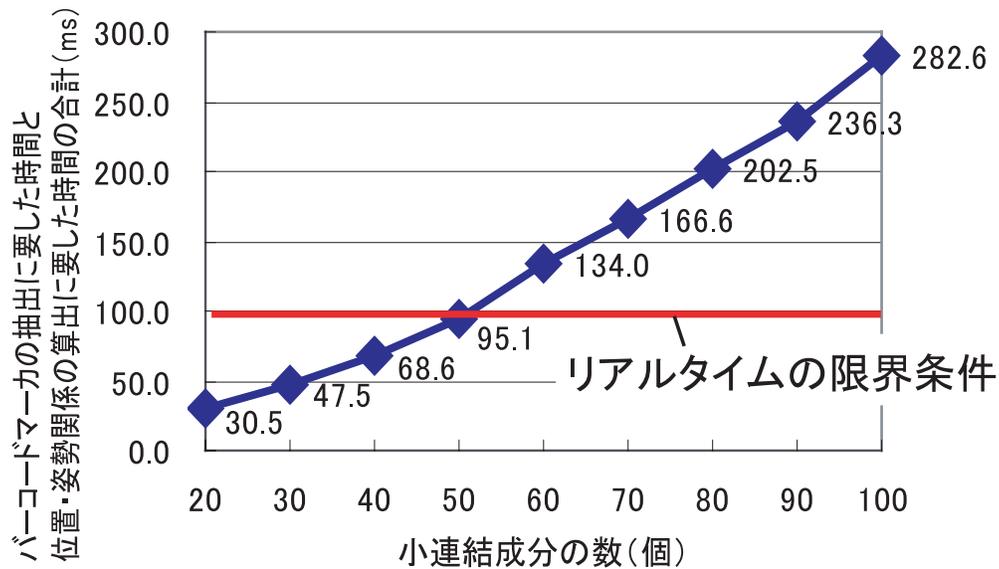


図 5.31: バーコードマーカの抽出に要した時間と位置・姿勢関係の算出に要した時間の合計

かった。また、処理時間の増加率は一定でなく加速度的であるがゆるやかに増していることも分かった。小連結成分が 50 個程度になると、毎秒 10 フレームの更新速度の限界に達することが分かった。なお、処理速度は評価実験に用いる PC のスペックによって大きく変化する。昨年度の研究では、本研究より高速な処理結果が得られているが、これは昨年度の研究では高性能のデスクトップ PC を用いて計測を行ったことが主原因である。

5.5 ふげん発電所での動作確認実験

上記までのすべての実験はバーコードマーカの抽出の妨げとなるようなノイズがバーコードマーカの付近に存在しない理想的な環境で行った。しかし、実際のふげん発電所構内ではバーコードマーカをパイプに貼り付けるため、バーコードマーカがパイプに沿って湾曲する、バーコードマーカを貼りつけたパイプの奥にある機器がノイズの原因となるなど、バーコードマーカを抽出しにくい環境であると考えられる。また、上記までの実験結果が実際のふげん発電所構内ではこういった結果になるか確認する必要もある。そこで、以下のような動作確認実験を行う。

実験の目的

本研究で開発した実験用システムを実際にふげん発電所構内で動作させ、バーコードマーカの抽出、識別が行えるか評価する。また、上記までの実験結果はふげん発電所構内ではどういった結果になるか評価する。

実験の方法と条件

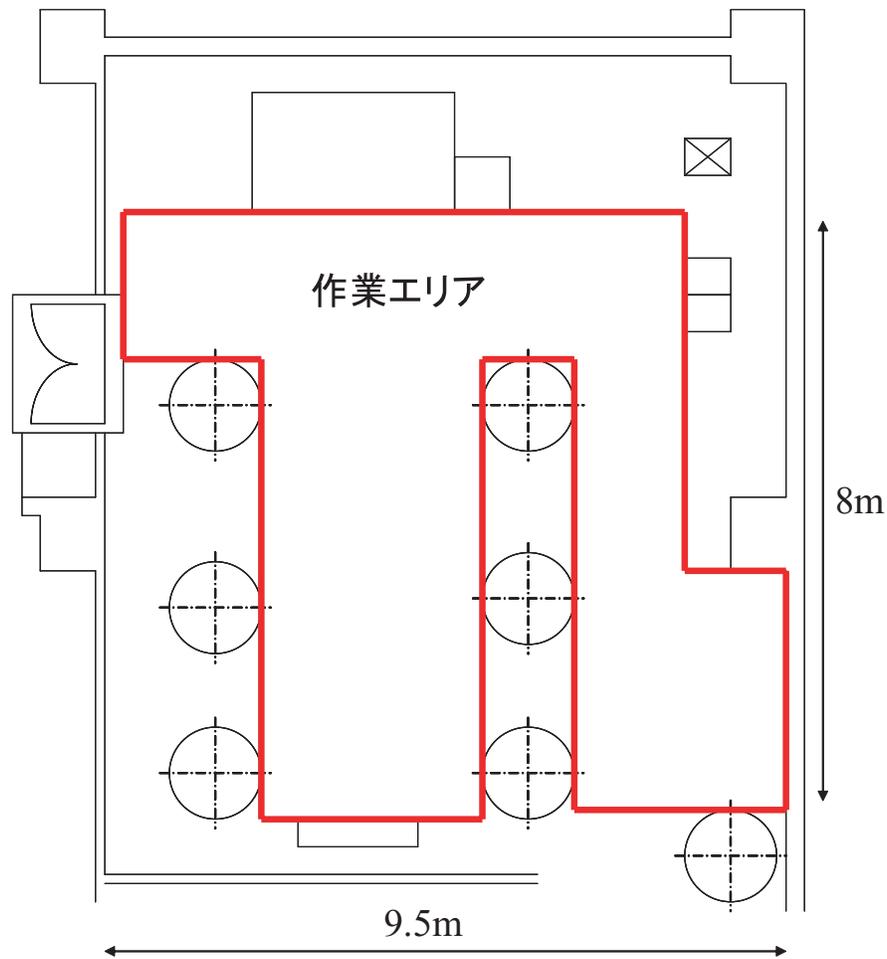


図 5.32: 作業環境の地図

実験を行った作業環境の地図を図 5.32 に示す。図 5.32 中の作業エリア内にて実験を行った。図 5.32 はふげん発電所構内にある純水装置室と呼ばれる一室で、放射能による汚染はないが管理区域に分類される。本実験はふげん発電所の責任者の了承を得、同行の下、実験を行った。

また、作業環境内で照度を計測した場所を示した地図を図 5.33 に、照度を計測した

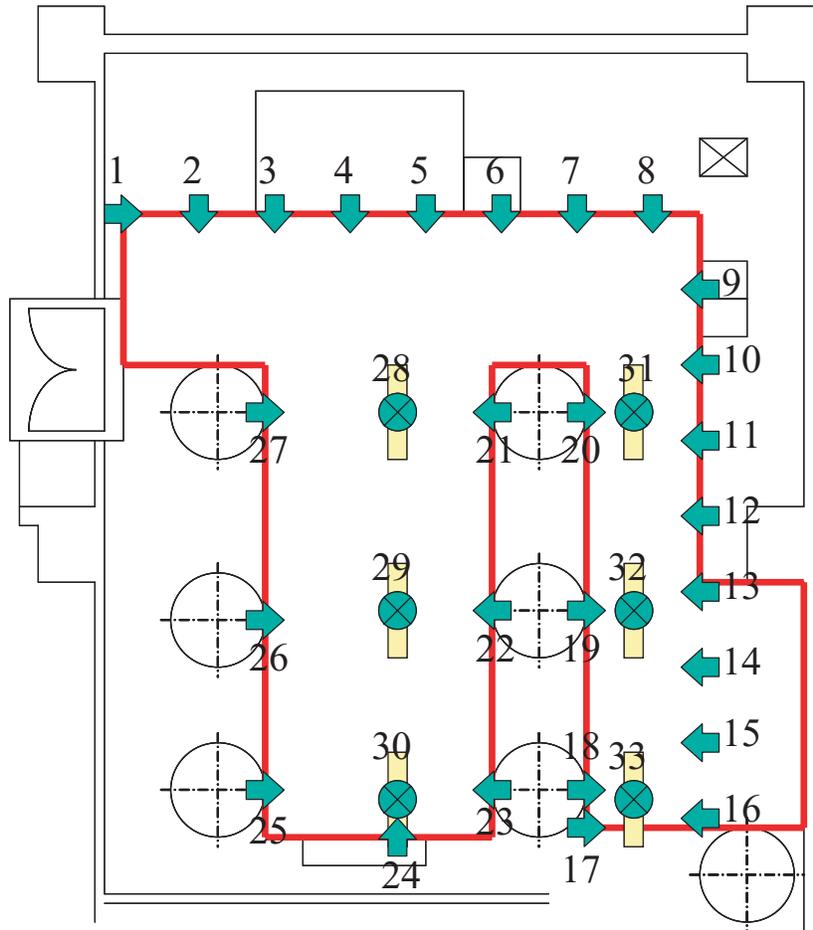


図 5.33: 照度を計測した場所を示した地図

表 5.9: 照度を計測した場所での照明条件

番号	高さ (m)	方向	照度 (lux)	番号	高さ (m)	方向	照度 (lux)
1	0.0	右	80	7	0.0	下	80
	0.5		101		0.5		90
	1.0		110		1.0		80
	1.5		110		1.5		110
	2.0		160		2.0		170
2	0.0	下	50	8	0.0	下	50
	0.5		60		0.5		80
	1.0		60		1.0		110
	1.5		70		1.5		130
	2.0		100		2.0		150
3	0.0	下	80	9	0.0	左	80
	0.5		90		0.5		90
	1.0		90		1.0		100
	1.5		100		1.5		110
	2.0		130		2.0		110
4	0.0	下	100	10	0.0	左	60
	0.5		90		0.5		70
	1.0		100		1.0		70
	1.5		100		1.5		70
	2.0		130		2.0		70
5	0.0	下	80	11	0.0	左	70
	0.5		100		0.5		70
	1.0		120		1.0		80
	1.5		110		1.5		70
	2.0		160		2.0		90
6	0.0	下	60	12	0.0	左	70
	0.5		80		0.5		100
	1.0		90		1.0		100
	1.5		80		1.5		100
	2.0		110		2.0		110

番号	高さ (m)	方向	照度 (lux)	番号	高さ (m)	方向	照度 (lux)
13	0.0	左	60	19	0.0	右	70
	0.5		70		0.5		80
	1.0		80		1.0		80
	1.5		70		1.5		60
	2.0		60		2.0		80
14	0.0	左	50	20	0.0	右	60
	0.5		60		0.5		60
	1.0		70		1.0		90
	1.5		80		1.5		50
	2.0		80		2.0		60
15	0.0	左	60	21	0.0	左	70
	0.5		50		0.5		130
	1.0		50		1.0		120
	1.5		60		1.5		130
	2.0		60		2.0		120
16	0.0	左	40	22	0.0	左	70
	0.5		50		0.5		130
	1.0		50		1.0		150
	1.5		80		1.5		170
	2.0		50		2.0		80
17	0.0	右	80	23	0.0	左	70
	0.5		60		0.5		90
	1.0		60		1.0		100
	1.5		110		1.5		120
	2.0		100		2.0		120
18	0.0	右	80	24	0.0	上	100
	0.5		90		0.5		100
	1.0		100		1.0		90
	1.5		80		1.5		120
	2.0		100		2.0		120

番号	高さ (m)	方向	照度 (lux)
25	0.0	右	70
	0.5		100
	1.0		110
	1.5		140
	2.0		200
26	0.0	右	60
	0.5		100
	1.0		130
	1.5		150
	2.0		240
27	0.0	右	80
	0.5		100
	1.0		130
	1.5		140
	2.0		190
28	0.0	垂直上	190
	0.5		240
	1.0		280
	1.5		400
	2.0		510
29	0.0	垂直上	100
	0.5		230
	1.0		250
	1.5		380
	2.0		480
30	0.0	垂直上	150
	0.5		190
	1.0		240
	1.5		340
	2.0		470

番号	高さ (m)	方向	照度 (lux)
31	0.0	垂直上	130
	0.5		180
	1.0		200
	1.5		250
	2.0		250
32	0.0	垂直上	170
	0.5		210
	1.0		250
	1.5		310
	2.0		400
33	0.0	垂直上	150
	0.5		210
	1.0		240
	1.5		300
	2.0		410

場所での照明条件を表 5.9 に示す。表 5.9 中の番号は図 5.33 中の番号と一致する。また、表中の高さとは照度を計測した高さであり、方向は図中の矢印の向きと一致する。図 5.33 中の 1 から 27 までの矢印の位置を示しており、その場所の矢印の向きに入射する照度を高さ 0.5m ごとに 0.0m から 2.0m まで測定した。また、図 5.33 中の 28 から 33 までは蛍光灯の位置を示しており、その場所の鉛直上向きに入射する照度を高さ 0.5m ごとに 0.0m から 2.0m まで測定した。

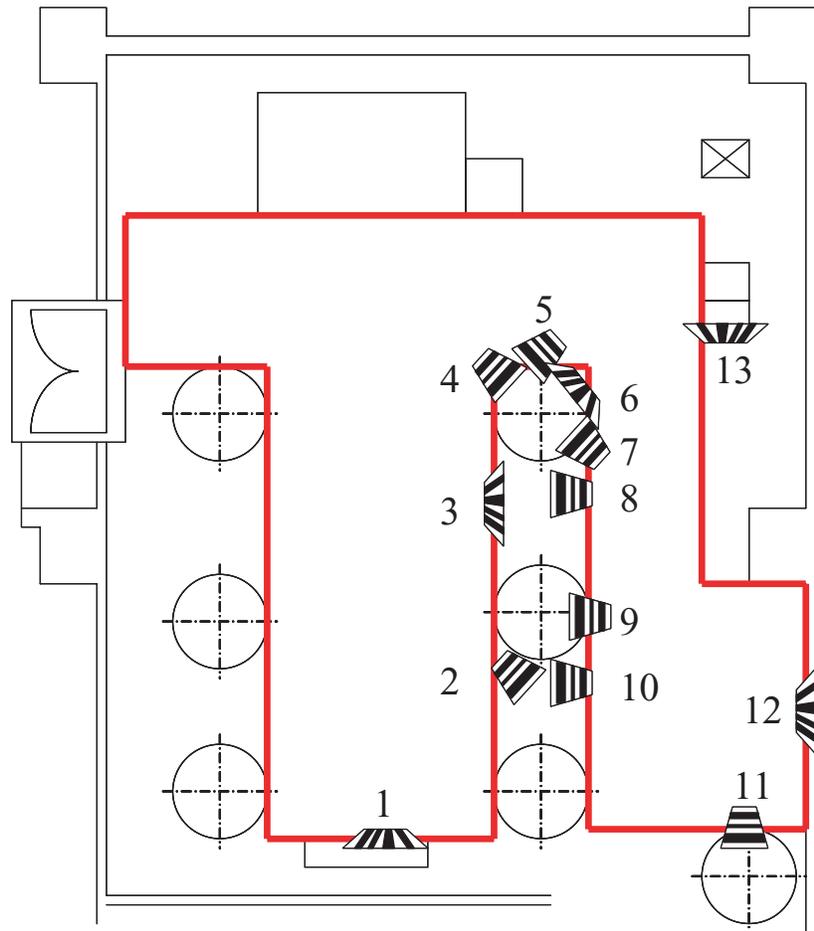


図 5.34: バーコードマーカを設置した場所を示した地図

また、作業環境内でバーコードマーカを設置した場所を示した地図を図 5.34 に、設置したバーコードマーカの各種条件を表 5.10 に示す。作業環境に貼り付けたバーコードマーカの数 は 13 個であった。表 5.10 中の番号は図 5.34 中の番号と一致する。また、表中の高さとはバーコードマーカを貼り付けた高さ、横縦の向きとはバーコードマーカを貼り付けた向きであり、方向は図中のバーコードマーカの向きと一致する。照度はバーコードマーカに向かって入射する照度で、1 つのバーコードマーカにつき両端の

表 5.10: 設置したバーコードマーカの各種条件

番号	高さ (m)	横縦の向き	方向	照度 (lux)	貼った場所の特徴
1	1.25	横	上	140 136 150	壁
2	1.10	縦	左上	150 140 170	直径 11.3cm のパイプ
3	2.22	横	左 (垂直斜め下)	80 85 85	直径 11.3cm のパイプ
4	1.50	縦	左上	180 160 135	直径 8.9cm のパイプ
5	1.80	縦	右上	100 105 135	直径 11.3cm のパイプ
6	1.12	横	右上	70 85 100	タンク
7	1.55	縦	右下	42 62 55	タンク
8	1.20	縦	右上	75 55 40	直径 8.9cm のパイプ
9	1.76	縦	右	135 75 45	タンク

番号	高さ (m)	横縦の向き	方向	照度 (lux)	貼った場所の特徴
10	0.96	縦	右	44 38 54	直径 8.9cm のパイプ
11	1.13	縦	上	95 80 80	直径 3.5cm のパイプ
12	1.73	横	左	150 145 150	壁
13	0.64	横	下 (垂直斜め上)	160 150 140	直径 11.3cm パイプ

黒縞と中央の黒縞の照度を計測した。また、照明を数箇所落とした状態でも動作確認を行った。その際の照明環境条件の記述は省略する。

本実験では本研究で開発した実験用システムを動作させて、こういった環境下ではバーコードマーカを抽出しやすいのか、またこういった環境下ではバーコードマーカを抽出しにくいのか確認した。さらに、バーコードマーカを抽出しやすい環境下で行った実験結果がふげん発電所構内ではどうなるのか確認した。

また、バーコードマーカのカメラ画像中の小連結成分が100個以上になった場合、100個までの小連結成分に対してトラッキング処理を行った。

さらに、バーコードマーカであると抽出した部分に、赤と緑の2種類のラインを表示するプログラムを組み込んだ。赤のラインのバーコードマーカは、バーコードマーカの形状をしているが、その符号情報が登録している符号情報と一致するものがないことを示す。つまり、バーコードマーカではないのに間違っただけで抽出してしまった可能性が非常に高い部分である。また、緑のラインのバーコードマーカは、バーコードマーカとして抽出し、その符号情報が登録している符号情報に一致するものがあることを示し、その上部にバーコードマーカの登録番号を表示する。なお、バーコードマーカではないのに間違っただけで抽出してしまった部分の符号情報が登録してある符号情報と偶然一致している場合も表示される。

実験結果



図 5.35: ふげん発電所構内 1 の原画像

本研究で開発した実験用システムのカメラで撮影したふげん発電所構内の様子の原画像を図 5.35、図 5.38、および図 5.41 に、またそれぞれの原画像に対して 2 値化処理を施した画像を図 5.36、図 5.39、および図 5.42 に、さらに 2 値化処理を施した画像の中で本システムがバーコードマーカであると抽出した部分にラインを表示した画像を図 5.37、図 5.40、および図 5.43 に示す。

考察

バーコードマーカを貼れる場所は主に壁とパイプであった。壁に貼ったバーコードマーカは正確に抽出、識別ができた。また、遠距離からトラッキングが可能となるような大きな ARToolKit マーカを貼れる場所は壁だけであった。ふげん発電所構内の照明条件は基本的には薄暗かったが、そのためにバーコードマーカが抽出しにくいということにはなかった。また、照明を数箇所落とし動作確認を行ったが、カメラ画像が暗くなるなどの変化は見られなかった。これはカメラに採光を自動で調節する機能が付いているためであると考えられる。

また図 5.35 に示すように、細いパイプにバーコードマーカを貼り付けた場合、バーコードマーカの周りの余白の部分がパイプの陰に隠れてしまった。このためカメラ画

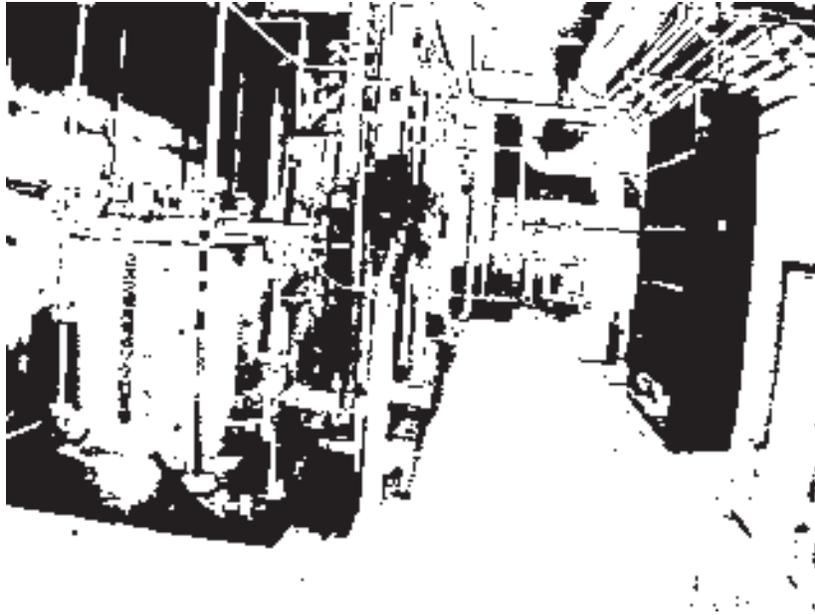


図 5.36: ふげん発電所構内1の2値画像



図 5.37: ふげん発電所構内1のバーコードマーカ抽出部ライン表示

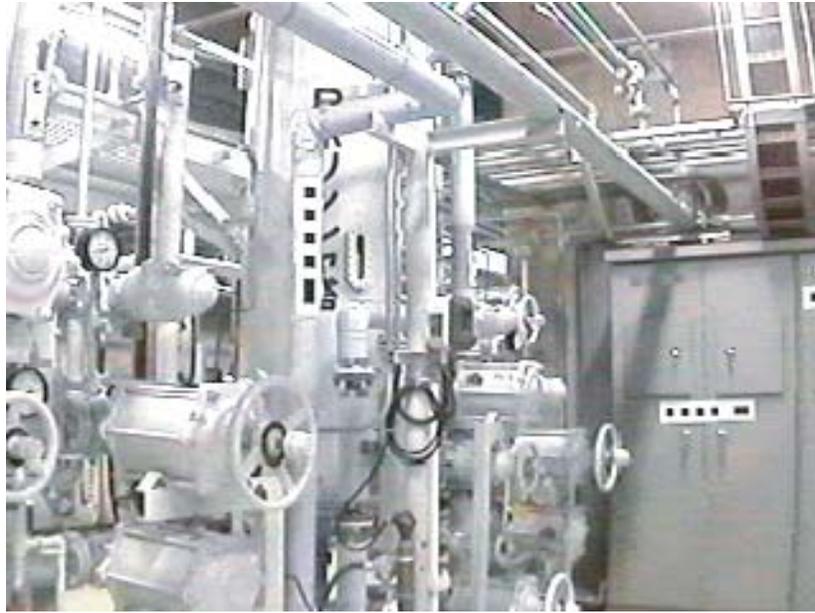


図 5.38: ふげん発電所構内 2 の原画像

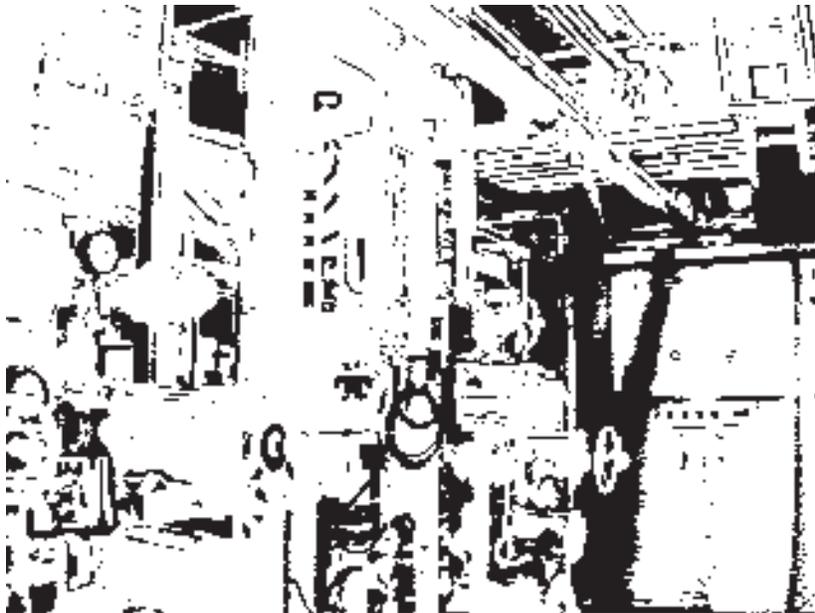


図 5.39: ふげん発電所構内 2 の 2 値画像

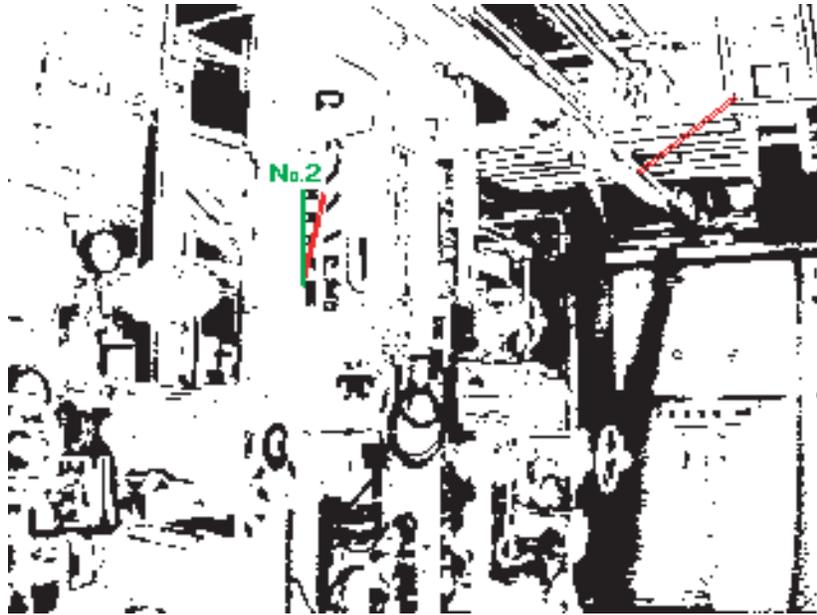


図 5.40: ふげん発電所構内 2 のバーコードマーカ抽出部ライン表示



図 5.41: ふげん発電所構内 3 の原画像

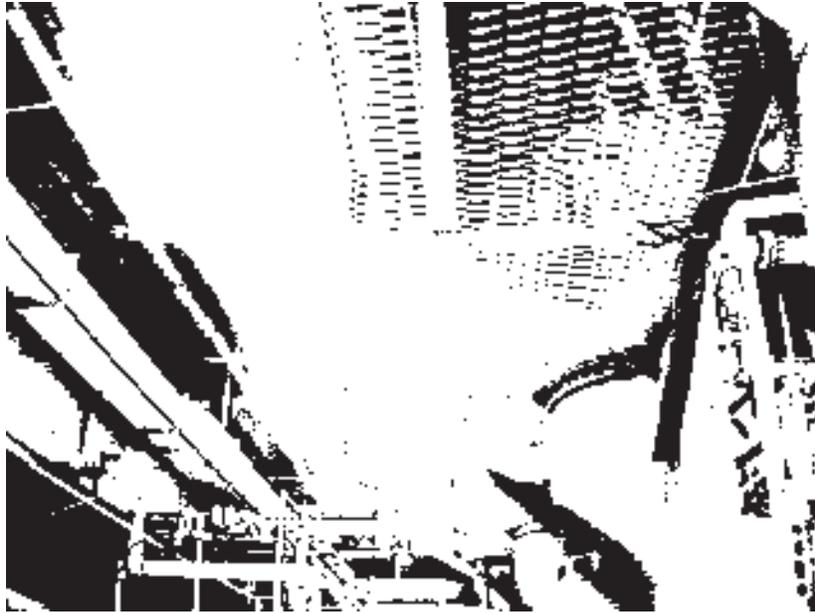


図 5.42: ふげん発電所構内3の2値画像

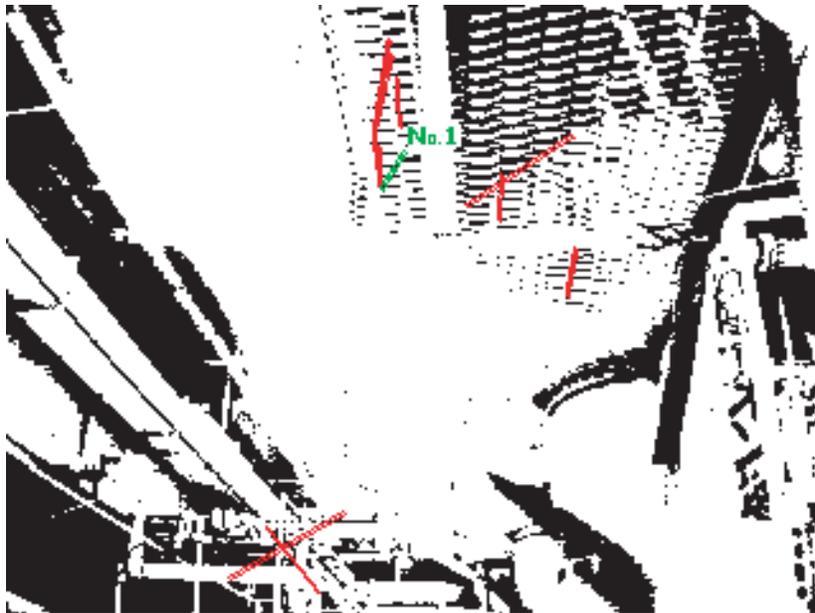


図 5.43: ふげん発電所構内3のバーコードマーカ抽出部ライン表示

像を2値化した場合、バーコードマーカの黒縞と背景による連結成分が結合してしまうのではないかという懸念があったが、図 5.36 に示すように実際には結合してしまう状況にはならなかった。

また図 5.37 に示すように、バーコードマーカを正しく抽出できない場合があった。本研究で開発したバーコードマーカ抽出方法では、一直線上に連なって6つ以上の小連結成分が存在する場合、バーコードマーカを正しく抽出できない。図 5.37 の場合では、実際に貼り付けてあるバーコードマーカの付近に黒縞の形状に似たノイズが多数存在したため、実際のバーコードマーカの黒縞を含め一直線上に連なって6つ目の小連結成分が存在し、バーコードマーカを抽出できなかったと考えられる。

図 5.40 の左側に示すように、バーコードマーカを正しく抽出、識別できる場合もあった。これは実際のバーコードマーカの黒縞を含め一直線上に連なって6つ目の小連結成分が存在しなかったためであると考えられる。図 5.40 の右側のバーコードマーカは正しく抽出できなかった。これは図 5.37 の場合と同様、実際のバーコードマーカの黒縞を含め一直線上に連なって6つ目の小連結成分が存在したためであると考えられる。

図 5.43 に示すように、実際はバーコードマーカではないのに登録してあるバーコードマーカとして抽出、識別してしまう場合があった。このように、紛らわしい模様のある環境では、バーコードマーカをご認識しやすくなると考えられる。

これら3つの原画像すべてにおいて赤のラインが表示された。これら赤のラインすべてがバーコードマーカの誤抽出であった。ノイズの多い環境でも正しくバーコードマーカを抽出できる抽出方法を開発する必要がある。

また、これら3つの原画像内の小連結成分の数はいずれも70個以上であった。これは本研究で開発した実験用システムの性能では要求仕様の毎秒10フレームの更新速度を実現できないことを意味する。実際にふげん発電所構内で本研究で開発した実験用システムを動作させた時、確かに更新速度が遅く感じられる場面が多く存在した。ふげん発電所構内では、複雑な形状をした機器が多く、その影響でカメラ画像内で多くの小連結成分が生じると考えられる。

バーコードマーカを正しく抽出できないという問題点の解決策としては、バーコードマーカの抽出の開始点と終了点の目印として、バーコードマーカの開始点と終了点に赤、青などのカラーの縞を加える方法が考えられる。この場合、バーコードマーカの抽出に用いる画像は2値画像でなく、白、黒、赤などの3値画像とし、バーコードマーカの抽出の開始点、終了点を浮き彫りにすることでバーコードマーカの部分をより正確に抽出できるようになると考えられる。

5.6 まとめと今後の課題

評価実験に対して行ったすべての考察をまとめると次のようになる。

- 2つのバーコードマーカの貼り付ける位置関係によるトラッキング精度の変化は奥行き方向の距離に関係なく、横方向、もしくは高さ方向の距離に大きく依存し、バーコードマーカを1.5m程度離して貼り付けることにより十分なトラッキング精度が得られ、カメラから2.0mから5.0mまでの範囲で利用できることが分かった
- フェルトのバーコードマーカを用いることで照明環境に左右されず安定してバーコードマーカを認識できることが分かった
- カメラ画像内に存在するバーコードマーカの黒縞の形状に似た小連結成分の数により本研究で開発した実験用システムの動作速度は大きく変化し、ふげん発電所構内などの複雑な形状をした機器が存在し小連結成分の数が多く存在する環境内ではリアルタイムにトラッキングできない場合があることが分かった
- ふげん発電所構内などの複雑な形状をした機器が存在し小連結成分の数が多く存在する環境内ではカメラ画像内にバーコードマーカの抽出を妨げるノイズが多く、バーコードマーカを抽出できない場合があることがわかった

また、今後の課題としては次のようなことが挙げられえる。

- 同一平面上にバーコードマーカが存在する場合でも、P4P問題を解くことによりトラッキングをできるようにする
- 複数のカメラを用いてバーコードマーカを撮影することで2つ以上のバーコードマーカをカメラに捉える確率を増やす
- 本研究で開発したシステムの動作速度が今よりもさらに速くなるように効率的な処理を行うバーコードマーカの抽出手法を開発する
- バーコードマーカの抽出を妨げるノイズの多い環境内でも正確にバーコードマーカを抽出、識別できるようにする

第 6 章 結論

本研究では、原子力発電プラントの解体作業中に必要な情報である放射線量に注目し、放射線量可視化に拡張現実間技術を適応したシステムを構築することを提案した。特に、遠距離から人工マーカを用いることで拡張現実間技術の使用を可能にすることを目的とし、システムの実装、および評価を行った。

第 2 章では、研究の背景として、原子力発電プラントにおける解体作業の現状と問題点を述べた。そして、この問題点の解決策として、現在研究が進められている次世代 HMS を用いた作業支援手法の中でも、拡張現実感技術を用いた作業支援方法が有効であることを述べ、拡張現実感技術の機能と特徴について概説し、関連する従来研究をまとめた。次いで、拡張現実感技術を解体作業支援に適応する際の課題として、遠距離からトラッキングが行える必要があることを述べ、トラッキング技術について簡単に説明した。そして以上を背景として研究の目的が、解体作業支援に適した拡張現実感技術用トラッキング手法の開発であることを述べた。

第 3 章では、解体作業支援に適したトラッキングの技術を選択するため、既存のトラッキング技術について、その利点と欠点を述べた。次いで、解体作業に関わる環境と作業員の特徴を挙げ、そこから開発するトラッキング技術への制限と要求仕様を詮索した。そしてそれらの考察を基に、解体作業支援に適したトラッキング技術として、人工マーカを用いたトラッキング技術が最も実用的であることを説明し、パイプに貼れる細長いバーコード型の形状の人工マーカを用いることを提案した。ついで、バーコード型の人工マーカを用いたトラッキング方法について説明した。

第 4 章では、第 3 章で述べた提案手法の設計を基に開発した実験用システムのハードウェア構成とソフトウェア構成について述べた。ハードウェア構成では、視界画像を取得する CCD カメラ、カメラ画像を PC に取り込める形式に変換するビデオキャプチャ、および画像処理を行うノート PC の仕様について説明した。ソフトウェア構成では、システム全体の流れを説明した。

第 5 章では、第 4 章で作成した実験用システムを用いて、本研究で提案したトラッキング手法についての基礎的な評価実験を行った。その結果、バーコードマーカの位置関係によってトラッキング精度が大きく変わり、バーコードマーカを 1.5m 程度の距離ごとに貼り付けることで 2m から 5m までの範囲で十分なトラッキング精度が得られる

ことが分かった。また、バーコードマーカの素材にフェルトを用いることで照明環境に影響されず、カメラ画像からのバーコードマーカの抽出、認識をロバストに行えることが分かった。撮影した環境内にバーコードマーカの黒縞と形状と似た模様、いわゆるノイズが多数ある場合、トラッキング速度は遅くなり、人が違和感を感じない限界の更新速度とされている毎秒 10 フレームの更新を実現できない場合も確認できた。次いで、基礎的な評価実験の結果が実際の原子力発電プラント内ではどういった結果になるか確かめ、今後の研究の課題を浮き彫りのするため、ふげん発電所構内で本システムの動作確認を行った。ふげん発電所構内では複雑な形状の機器が多く存在した。そのため、これらの機器がノイズとなり、バーコードマーカの抽出を妨げる場合が多いことが分かった。また、ノイズが多いためトラッキング速度が遅くなり、毎秒 10 フレームの更新速度を実現できない場合が多いことも分かった。これらの問題から、ノイズの多い環境内でもバーコードマーカを正しく抽出、識別できるアルゴリズムを開発する必要があることが分かった。また、処理速度の早い効率的なアルゴリズムであることも必要であると分かった。

本研究での結果から、バーコード型の人工マーカによる遠距離からトラッキングの実現が期待できる。今後は本研究では実現できなかった、バーコードマーカの抽出の妨げとなるノイズの多い環境内でもバーコードマーカの抽出ができるアルゴリズムの開発を行い、さらなるシステムの改良を進めていく必要がある。

謝 辞

本論文の執筆にあたり、数多くの方々の御支援、御協力をいただきました。ここに
お一人ずつ謝意を表明いたします。

吉川榮和教授には、本研究を進めるにあたり、研究の方向性、研究の位置づけ、論
文執筆の方法など、すべての研究活動について適切かつ暖かいご指導いただきました
こと、深く感謝致します。また、海外出張の際におみやげとして買ってくださったド
リアンまんじゅうの味、忘れられない思い出です。ありがとうございました。

下田宏助教授には、研究全般にわたって細部にいたるまで直接ご指導いただいたこ
と、また数々の適切な助言をいただいたこと、深く感謝致します。また、怖面の人が
乗っていそうな車に乗せていただいたこと、いい思い出です。ありがとうございました。

石井裕剛助手には、ノルウェーから数々の助言をいただいたこと、深く感謝致しま
す。また、腰の入ったうどんの作り方を教えていただき、ありがとうございました。

ふげん発電所の井口さん、兼平さん、泉さん、本研究実施のため、さまざまなご協
力をしていただき、誠にありがとうございました。

本研究室の卒業生である松井康治さんには、P6P 問題の解法について熱心にご説明
いただいたこと、深く感謝致します。

修士 2 回生の佐野真治氏には、サッカーの TV ゲームでストレス発散させていただ
いたこと、深く感謝致します。

修士 1 回生の関山友輝氏には、プログラミングに関する数々の助言をいただいたこ
と、深く感謝致します。

学部 4 回生の中井俊憲氏には、同じチームで研究に協力していただいたこと、深く
感謝致します。

学部 4 回生の鶴田将之氏には、野球の TV ゲームでストレス発散させていただいた
こと、深く感謝致します。

また、ともに研究に励み、ともに遊んだ、修士 2 回生の西村泰典君、本郷泰司朗君、
今木智隆君、河内美佐さんに深く感謝致します。

駒井秘書、吉川万里子秘書には、日ごろから何かとお世話をさせていただいたこと、深
く感謝致します。

その他の研究室の皆様にも、ここに御礼申し上げます。



ふげん発電所の泉さん

参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構・ふげん発電所ホームページ
<http://www.jnc.go.jp/zfugen/>(2005年1月31日現在)
- [2] Drovoldsmo, A., Johnsen, T., Loulca, M.N., Reigstad M.: Using wearable equipment for an augmented presentation of radiation, EPRI Wireless Conference, Orlando, Florida, pp.19-21(Nov2002)
- [3] 尾崎貞彦, 吉川榮和, 北村正晴, 古田一雄, 五福明夫, 伊藤広二: 原子力発電所運用高度化のための次世代 HMS の技術開発, 日本原子力学会 2002 年春の年会要旨集, 第 分冊, p407(2002)
- [4] Ronald Azuma: A Survey of Augmented Reality, Presence, Vol.6, No.4, pp.355-385(1997)
- [5] Ronald Azuma, Yohan Baillet, Reinhold Behringer, Steven Feiner, Simon Julier, Blair MacIntyre: Recent Advances in Augmented Reality, IEEE Computer Graphics and Applications, 21, 6(Nov/Dec(2001)), pp.34-47(2001)
- [6] BOEING: Mathematics and Computing Technology Focus,
http://www.boeing.com/assocproducts/art/tech_focus.html(2003年1月31日現在)
- [7] Steven Feiner, Blair MacIntyre, Doree Seligman: KARMA,
<http://www.cs.columbia.edu/graphics/projects/karma/karma.html>(2003年1月31日現在)
- [8] Hirokazu Kato, Mark Billinghurst: Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System, Proc. of 2nd Int. Workshop on Augmented Reality, pp.85-94(1999)

- [9] Sebastian Vogt, Ali Khamene, Frank Sauer, Heinrich Niemann: Single camera tracking of marker clusters: multiparameter cluster optimization and experimental verification Proc. IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.127-136(2002)
- [10] Bolan Jiang, Ulrich Neumann: Extendible Tracking by Line Auto-Calibration, Proc. IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, pp.97-103(2001)
- [11] Joseph Newman, David Ingram, Andy Hopper: Augmented reality in a wide area sentient environment, Proc. IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, pp.77-86(2001)
- [12] FASTRAK <http://www.polhemus.com/FastTrak/>(2004年1月31日現在)
- [13] 横小路泰義, 菅原嘉彦, 吉川恒夫: 画像と加速度計を用いたHMD上での映像の正確な重ね合わせ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol4, No.4, pp.589-598(1999)
- [14] 藤井博文, 神原誠之, 岩佐英彦, 竹村治雄, 横矢直和: 拡張現実のためのジャイロセンサを併用したステレオカメラによる位置合わせ, 電子情報通信学会 技術研究報告, PRMU99-192(2000)
- [15] Greg Welch, Gary Bishop, Leandra Vicci: SCAAT:Incremental Tracking with Incomplete Information, Proc. SIGGRAPH, pp.333-344(1997)
- [16] Bruce Thomas, Victor Demczuk, Wayne Piekarski, David Hepworth, Bernard Gunther: A Wearable Computer System with Augmented Reality to Support Terrestrial Navigation, 2ND. International Symposium on Wearable Computers, pp.166-167(1998)
- [17] 出口光一郎: センシング/認識シリーズ 第5巻 画像と空間 コンピュータビジョンの幾何学, pp.128-142, 昭晃堂 (1997)
- [18] 出口光一郎: ロボットビジョンの基礎, pp.17-24, 昭晃堂 (1997)
- [19] Michael Kalkusch, Thomas Lidy, Michael Knapp, Gerhard Reitmayr, Hannes Kaufmann, Dieter Schmalstieg: Structured Visual Markers for Indoor Pathfinding, 1st Int'l Augmented RealityToolkit Workshop, Darmstadt, Germany, (Sep 2002)

- [20] 藤野秀則, 画像処理を用いた環境の変化にロバストな物体認識手法の開発と評価, エネルギー科学研究科エネルギー社会環境科学専攻修士論文, pp.33-37, (2003)
- [21] 松井康治, 系統隔離作業支援システムにおける拡張現実感用トラッキング手法の開発, エネルギー科学研究科エネルギー社会環境科学専攻修士論文, pp.54-59, (2003)

付録 A AR Tool Kit

A.1 AR Tool Kit の概要

広島市立大学の加藤氏らによって開発され、ワシントン大学 HIT Lab の WWW サーバでソースコードが公開されている AR Tool Kit は、正方形マーカ上に 3 次元仮想物体の重ね合わせを行う拡張現実感 (Augmented Reality :AR) システム構築用ツールである。情報端末とカメラと HMD があれば AR Tool Kit を利用して容易に AR システムを構築できる。表示のみではなく 3 次元での情報操作が可能なインタフェースシステムや、デスクトップ・テーブルトップでの拡張現実感アプリケーションの開発を得意としている。理論的にはマーカを設置すれば屋外環境、大規模空間でも利用可能だが、テーブル上の空間程度の大きさでの利用が現実的である。

AR Tool Kit は C 言語で記述されたマルチプラットフォームのソフトウェアであり、画像入力ライブラリ (libARVideo)、画像処理ライブラリ (libAR)、画像表示ライブラリ (libARgsub) と、光学シースルー HMD 用キャリブレーションや複数マーカによる位置計算等の補助ライブラリ (libARgsubUtil、libARMulti) によって構成される。

AR Tool Kit を用いて構築した AR システムでは、カメラキャリブレーション、HMD キャリブレーション、マーカ検出処理、マーカ座標系からカメラ座標系への座標変換行列を求める処理 (マーカの 3 次元位置推定)、HMD スクリーンの適切な位置への仮想物体描画処理などの処理が可能である。

AR Tool Kit を利用した AR システムによって仮想物体を表示している例を図 A.1 に示す。

以降に本研究で利用した AR Tool Kit のマーカ検出処理とマーカの 3 次元位置推定処理について述べる。

A.2 マーカ検出処理

A.2.1 取り扱う座標系

図 A.2 に AR Tool Kit システムが取り扱う座標系を示す。仮想物体はマーカ座標系の上で表現される。カメラ座標系は焦点位置を原点、画像平面に垂直な方向を Z 軸、画像の

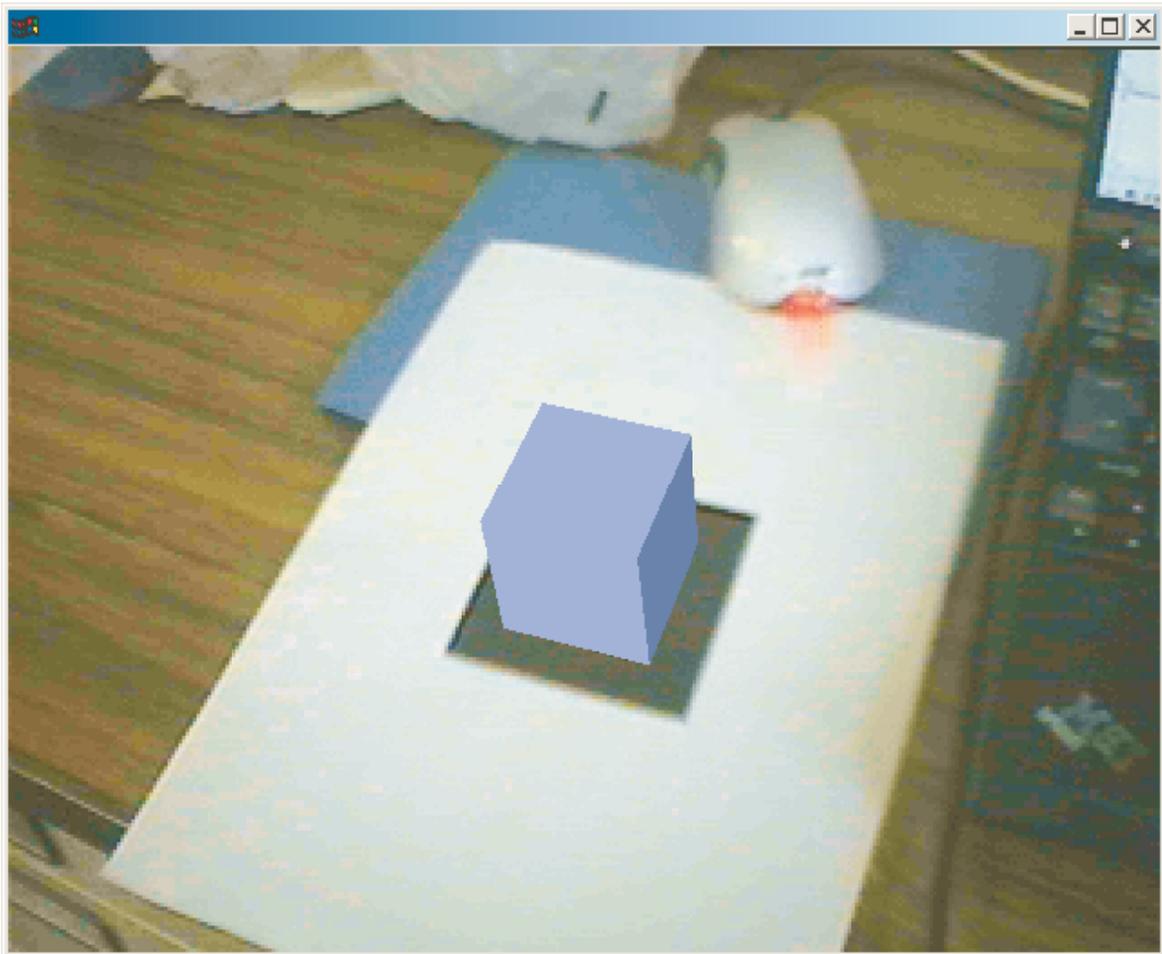


図 A.1: AR Tool Kit の使用例

x, y 軸に平行な方向を各 X, Y 軸とする。マーカ座標系で表現された点 (X_m, Y_m, Z_m) は、回転・平行移動でカメラ座標系でカメラ座標系に変換可能で、その座標系では (X_c, Y_c, Z_c) と表記する。透視変換モデルによって投影される画像平面は理想スクリーン座標系と呼び、この座標系においては (x_c, y_c) に写るものとする。また、理想スクリーン座標系から歪み関数によって変換された座標系を観測スクリーン座標系とし、実際にカメラから取り込まれたデータをこの座標系で表現し、その座標値を (x_d, y_d) で表す。

HMD と目は理想的な透視変換モデルで変換でき、HMD の映像表示面を HMD スクリーン座標系と呼び、その上の座標値を (x_s, y_s) で表す。この HMD スクリーン座標系に対し同一方向に X, Y 軸を持ち、垂直な方向に Z 軸を有する目の焦点位置を原点とする座標系を目座標系と呼び、その座標系は (X_e, Y_e, Z_e) で表す。

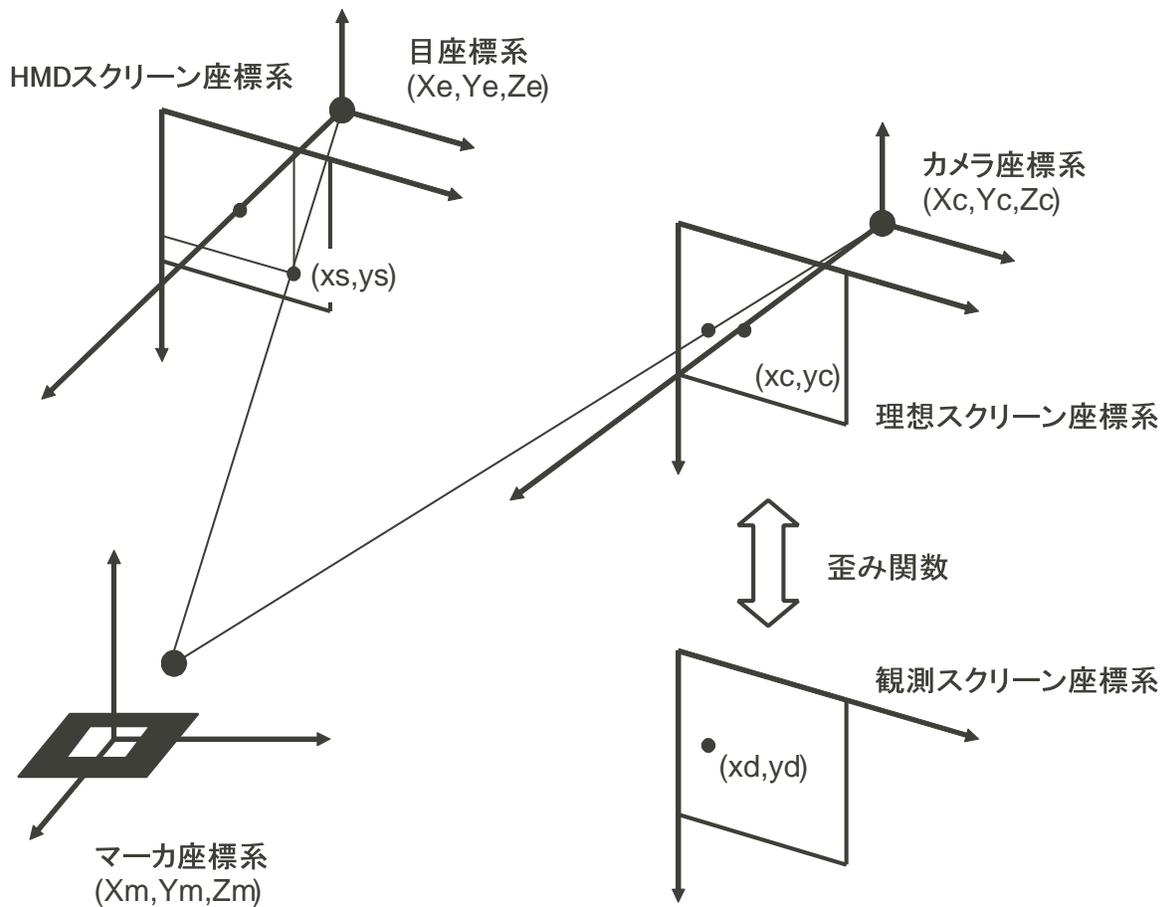


図 A.2: システムが取り扱う座標系

A.2.2 マーカ抽出

入力された画像に対して、固定閾値による2値化、連結領域ごとの面積・外接長方形計算を行ったのち、面積値によって巨大領域と微小領域を除外し、外接長方形情報から画像境界に接する連結領域も除外する。残された連結領域に対して輪郭線追跡を行い、輪郭線上の画素位置を全て記憶する。輪郭線データに対して折れ線近似を行い、4本の線分によって十分な精度で近似できた連結領域をマーカ候補とする。このときの4つの折れ点の座標値を記憶しておく。

A.2.3 マーカ識別

図A.3にマーカの例を示す。マーカの中央部に識別用のパターンが描かれている。このパターンを事前に登録したパターンとのテンプレートマッチングによって識別する。マーカは透視変換モデルによって理想スクリーン座標系に投影されるので、マーカ座標系 $(X_m - Y_m, 0)$ 平面内の点 $(X_m, Y_m, 0)$ は以下の式で理想スクリーン座標系上の点 (x_c, y_c) に変換される。

$$\begin{pmatrix} hx_c \\ hy_c \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

マーカの大きさは既知なので、その情報とマーカ抽出処理で求めた4頂点の座標値を用いると、この式のすべての C の値を求められる。従って、マーカ内部のパターンはこの式によって正規化できる。具体的にはマーカ内部のパターン領域を 64×64 に分割し、その領域に対する画素値を入力画像から抜き出し、 64×64 画素のパターン画像を得る。これを 16×16 に縮小しテンプレートマッチングに使用する。マーカの回転に対処するために、90度おきに回転したテンプレートを4枚作成しておき、それらと入力画像に対し以下の式で類似度を計算し、最大値をとるものをマーカの種類および方向と見なす。

$$s^{(l)} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \tilde{x}) \cdot (x_i^{(l)} - \tilde{x}^{(l)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \tilde{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i^{(l)} - \tilde{x}^{(l)})^2}} \quad (\text{A.2})$$

ここで x_i は画像ベクトルの i 番目の要素を示す。 \tilde{x} は要素の平均値で、 N は画素の

階調数、この場合は256となる。 x^l は l 番目のテンプレート画像を意味する。この式は明るさの正規化された2つの画像ベクトルの余弦を求めることになる。

A.2.4 4頂点位置検出

マーカの各辺に対応する輪郭線データに最小2乗法で直線当てはめを行い、それら直線の交点を頂点座標値とする。この直線当てはめの際、以下の歪み関数による変換を行い、理想スクリーン座標系における頂点座標値を求める。

$$\begin{aligned} \frac{z_d}{z_c} &= \{1 - pz_c^2\}, \\ z_c^2 &= (x_c - x_{c0})^2 + (y_c - y_{c0})^2, \quad z_d^2 = (x_d - x_{c0})^2 + (y_d - y_{c0})^2 \\ x_d &= \frac{z_d}{z_c}(x_c - x_{c0}) + x_{c0}, \quad y_d = \frac{z_d}{z_c}(y_c - y_{c0}) + y_{c0} \end{aligned} \quad (A.3)$$

ここで (x_c, y_c) は理想スクリーン座標系での座標値、 (x_d, y_d) は観測スクリーン座標値である。また、 p は歪み率、 (x_{c0}, y_{c0}) は歪み中心座標値で、この3パラメータはカメラキャリブレーションによって求めておく。ここでの計算では、式(A.3)の逆変換が必要となるが、その計算は初期値を (x_d, y_d) としたニュートン法の4回の繰り返しで十分な精度が得られる。観測された正方形マーカ画像では樽型歪みでの影響でその辺は曲線となるが、この変換によって辺は直線として扱うことができる。

A.3 マーカの3次元位置推定

これはマーカ座標系からカメラ座標系への変換行列 T_{cm} を推定する問題である。この変換行列は回転移動成分 $R_{3 \times 3}$ と平行移動成分 $T_{3 \times 1}$ からなる。理想スクリーン座標系とカメラ座標系の間は透視変換モデルで変換でき、その具体的な変換行列は事前のキャリブレーションにより求めておく。これらの座標系はの関係は式(A.4),(A.5)のように表現できる。式(A.1)は、マーカ座標系の $X_m - Y_m$ 平面内座標値と理想スクリーン座標系の関係式であるが、以下の式はマーカ座標系の3次元座標値を取り扱うものである。

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} &= \mathbf{T}_{\text{cm}} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{T}_{3 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{pmatrix} \tag{A.4}
\end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} hx_c \\ hy_c \\ h \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{P} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} \tag{A.5}$$

マーカ座標系におけるマーカの4頂点の座標値は図 A.3 に示すように設定されており、これらに対応する理想スクリーン座標系における座標値もこれまでの処理で得られている。これらの情報から式 (A.4) における \mathbf{T}_{cm} を求めるが、その手順は、

1. 回転移動成分 $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ の推定
2. 平行移動成分 $\mathbf{T}_{3 \times 1}$ の推定
3. 変換行列 \mathbf{T}_{cm} の修正

となる。

A.3.1 回転移動成分 $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ の推定

理想スクリーン座標系におけるマーカの頂点位置から向かい合う2辺の直線の方程式が得られる。それを式 (A.6) のように表し、式 (A.5) の x_c, y_c をこれに代入することで式 (A.7) が得られる。

$$a_1x + b_1y + c_1 = 0, \quad a_2x + b_2y + c_2 = 0 \tag{A.6}$$

$$a_1P_{11}X_c + (a_1P_{12} + b_1P_{22})Y_c + (a_1P_{13} + b_1P_{23} + c_1)Z_c = 0 \tag{A.7}$$

$$a_2P_{11}X_c + (a_2P_{12} + b_2P_{22})Y_c + (a_2P_{13} + b_2P_{23} + c_2)Z_c = 0$$

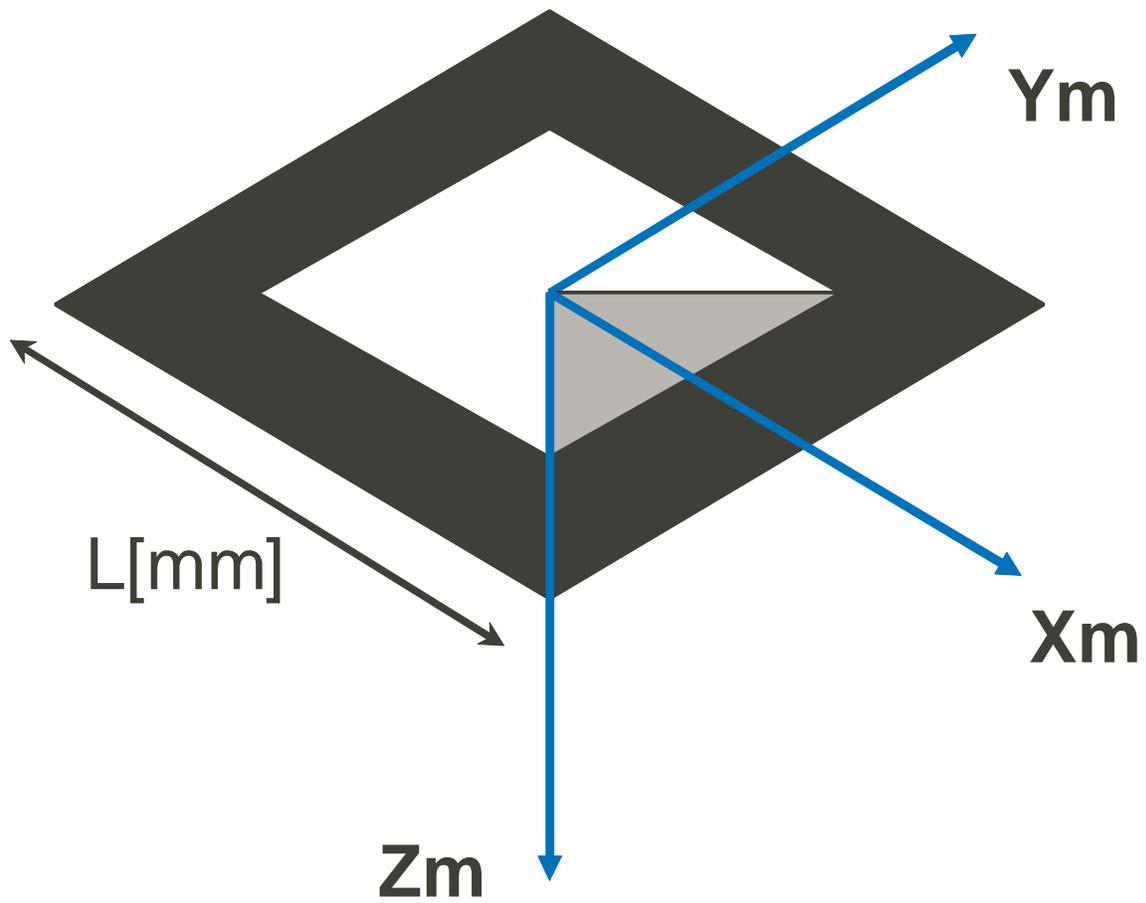


図 A.3: マーカの例

この式はカメラ座標系によって表現される3次元空間中の平面の方程式であり、3次元空間中のマーカの辺がこの平面内に存在することを意味する。マーカの向かい合う2辺は平行なのでその方向ベクトルは一致し、式(A.7)の2平面の面内方向となる。つまり、式(A.7)の2平面の各法線ベクトルの外積として計算されるベクトルが、平行2辺のカメラ座標系における方向ベクトルとなる。この計算を2組の平行2辺に対して行うことでマーカの隣り合う2辺の方向ベクトル U_1, U_2 を求めることができる。

A.3.2 平行移動成分 $T_{3 \times 1}$ の推定

式(A.4)(A.5)を結合し、マーカの4頂点のマーカ座標系での座標値、理想スクリーン座標系での座標値を代入すると、 T_1, T_2, T_3 に関する1次方程式が8個得られる。行列 P, R が既知なので、これらの式から T_1, T_2, T_3 を計算できる。

A.3.3 変換行列 T_{cm} の修正

以上の計算で T_{cm} は計算されるが、回転行列の計算において大きな誤差を伴う。そこで再度画像情報を利用し回転行列の修正を行う。(式4)においては回転行列は9個のパラメータで表現されているが、これを3つの回転角(a: Z_m 軸の傾斜方向, b: Z_m 軸の傾斜角度, c: X_m-Y_m 平面の Z_m 軸周りの回転角)で表現する。これはZYZオイラー角表現を修正したものである。通常のエイラー角表現ではベクトルの微小変動が回転角に大きな変化を及ぼす場合があるが、この表現ではそのような影響が小さい(式8)に回転行列を回転角で表した式を示す。

$$R = \begin{pmatrix} \cos a \cos b \cos(c-a) - \sin a \sin(c-a) & -\cos a \cos b \sin(c-a) - \sin a \cos(c-a) & \cos a \sin b \\ \sin a \cos b \cos(c-a) + \cos a \sin(c-a) & -\sin a \cos b \sin(c-a) + \cos a \cos(c-a) & \sin a \sin b \\ -\sin a \cos(c-a) & \sin a \sin(c-a) & \cos b \end{pmatrix} \quad (A.8)$$

この式より(式9)が導出でき、回転行列 $R_{3 \times 3}$ から各回転角を求めることができる。

$$\begin{aligned}
\cos b &= R_{33} \\
\cos a &= R_{13} / \sin b \\
\sin a &= R_{23} / \sin b \\
\sin c &= (R_{32}R_{13} - R_{31}R_{23}) / (R_{13}^2 + R_{23}^2) \\
\cos c &= -(R_{13}R_{31} + R_{23}R_{32}) / (R_{13}^2 + R_{23}^2)
\end{aligned} \tag{A.9}$$

そこで、これまでに求めた T_{cm} を用いて、マーカー4頂点の座標値を(式4.5)に代入することで、その理想スクリーン座標値を計算できる。この計算値と実際に画像処理によって求められた値の誤差の2乗和が少なくなるように a, b, c の値を修正する。具体的には、山登り法を用いて10回の繰り返し処理により新たな回転成分 $R_{3 \times 3}$ を求める。さらに2.3.2の処理を再適用し平行移動成分 $T_{3 \times 1}$ も更新する。この処理の理論的な収束性は証明していないが、初期値が適切に与えられること、回転ベクトルの微小変化が3つの回転角 abc に対しても微小変化しか与えないことから、妥当なものと考え、実験的に問題がないことを確認した。

A.4 カメラキャリブレーション

カメラキャリブレーションでは 4×6 の格子点を持つ板を使用する。この板をカメラで撮影し、図A.4, A.5のようにキーボード操作で各格子点に対してフィッティングを行う。この作業を数回繰り返し、観測される全ての格子点に対してその3次元座標値と観測スクリーン座標系での座標値を式(A.11)に代入することで、パラメータ C_{ij} に関する一次方程式が多数得られ、その値を計算できる。この行列 C は式(A.11)に示すように透視変換成分と回転・平行移動成分に分割することができ、 R の回転行列としての制約を用いることで、透視変換行列 P を計算できる。

$$\begin{pmatrix} hx_c \\ hx_y \\ h \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.10})$$

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.11})$$

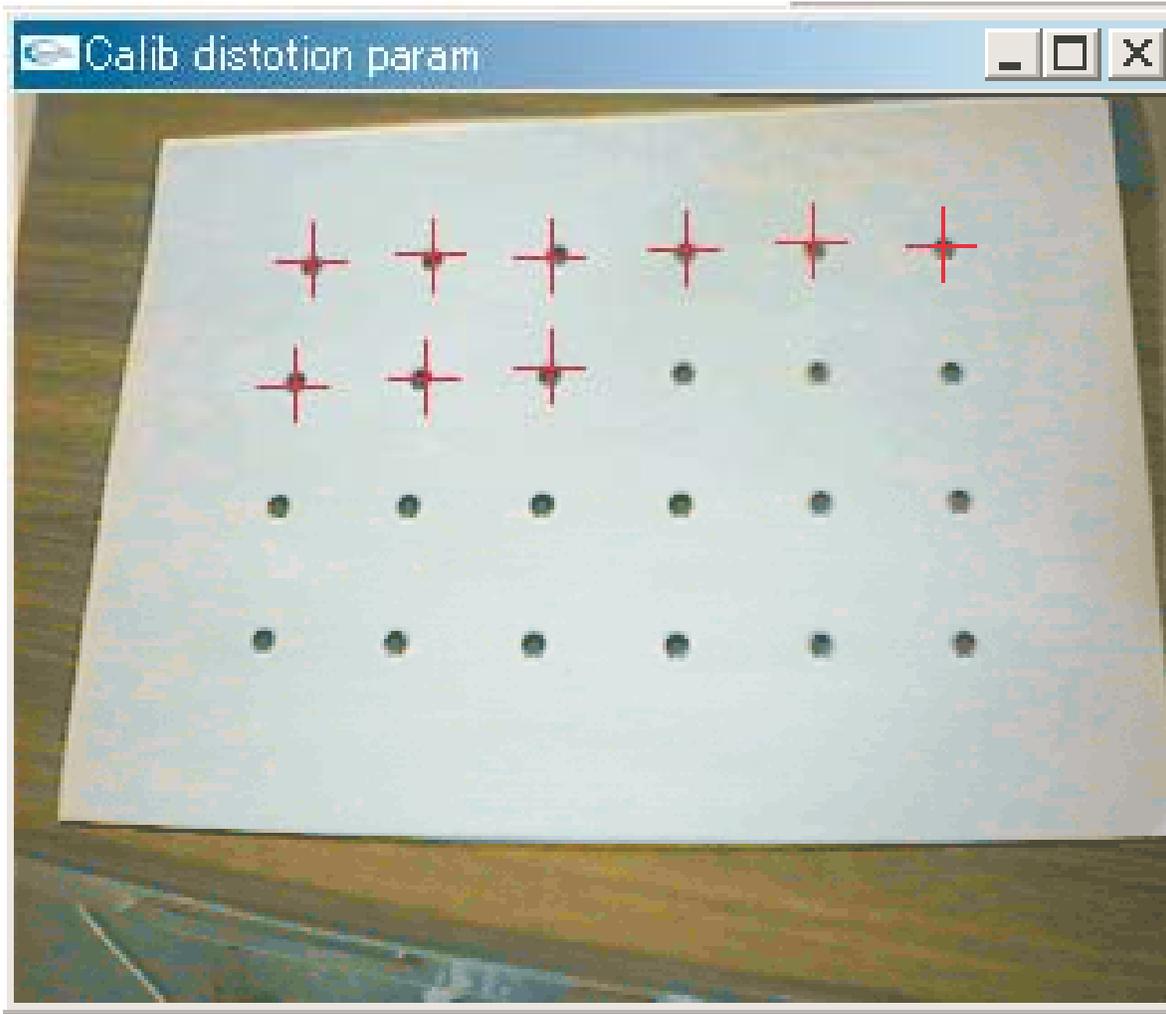


図 A.4: 格子点のフィッティング 1

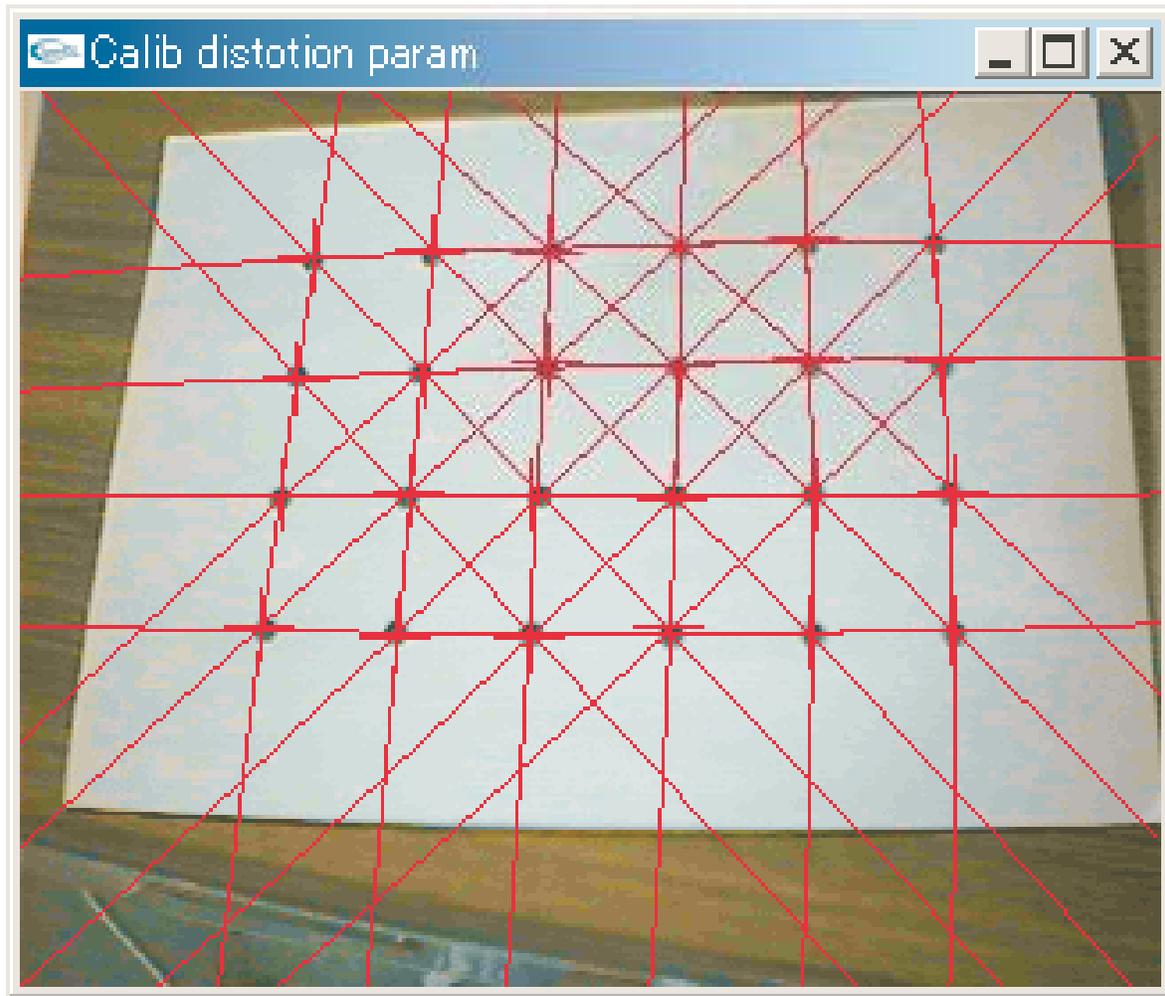


図 A.5: 格子点のフィッティング2

付録 B 6つの自然特徴点を利用したカメラの位置と姿勢推定

三次元位置と画像上の座標との対応が取れている n 点を用いて撮影したカメラの位置・姿勢を求める問題を、透視 n 点問題 (PnP 問題) と言う^[17]。この問題は、最小で3つの点の組があれば解くことができるが、高次の連立方程式を解く必要があるため、本研究では平易な計算で導出可能となる6点を用いる $P6P$ 問題を解くこととする。この6点は同一平面上にあってはならないという条件がつく^[18]。カメラ位置推定に利用可能な点から、同一平面にない点の組を選択して利用することとする。

今、三次元空間中の6点の斉次座標を、

$$[\mathbf{a}_i] \quad (\mathbf{a}_i = \langle a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, 1 \rangle, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (\text{B.1})$$

と置き、それぞれに対応する画像上の6点の斉次座標を、

$$[\mathbf{b}_i] \quad (\mathbf{b}_i = \langle b_{i1}, b_{i2}, 1 \rangle, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (\text{B.2})$$

とすると、透視変換行列 M を、

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} \end{pmatrix} \quad (\text{B.3})$$

として、

$$[\mathbf{a}_i M] = [\mathbf{b}_i] \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (\text{B.4})$$

斉次座標には定数倍の自由度があるので、 h_i をある実数として、式 B.4 は、

$$\mathbf{a}_i \mathbf{M} = h_i \langle s_i, t_i, 1 \rangle \quad (\text{B.5})$$

と書ける。

M を 3 つの列ベクトルで、

$$\mathbf{M} = \left(\begin{array}{c|c|c} \mathbf{m}_1 & \mathbf{m}_2 & \mathbf{m}_3 \end{array} \right) \quad (\text{B.6})$$

と表すと、

$$\mathbf{a}_i [\mathbf{m}_1 \quad \mathbf{m}_2 \quad \mathbf{m}_3] = h_i \langle s_i, t_i, 1 \rangle \quad (\text{B.7})$$

となり、まず、

$$\mathbf{a}_i \mathbf{m}_3 = h_i \quad (\text{B.8})$$

したがって、

$$\mathbf{a}_i [\mathbf{m}_1 \quad \mathbf{m}_2] = (\mathbf{a}_i \mathbf{m}_3) \langle s_i, t_i \rangle \quad (\text{B.9})$$

となる。

そこで、各 m_i の成分をたてに並べて、

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} \mathbf{m}_1 \\ \mathbf{m}_2 \\ \mathbf{m}_3 \end{pmatrix} \quad (\text{B.10})$$

と置けば、

$$\begin{pmatrix} \mathbf{a}_i & 0 & -s_i \mathbf{a}_i \\ 0 & \mathbf{a}_i & -t_i \mathbf{a}_i \end{pmatrix} \mathbf{m} = 0 \quad (\text{B.11})$$

これを6点についてまとめて書くと、

$$\begin{pmatrix}
 a_{11} & a_{12} & a_{13} & 1 & & & & & -s_1 a_{11} & -s_1 a_{12} & -s_1 a_{13} & -s_1 \\
 a_{21} & a_{22} & a_{23} & 1 & & & & & -s_2 a_{21} & -s_2 a_{22} & -s_2 a_{23} & -s_2 \\
 a_{31} & a_{32} & a_{33} & 1 & & & & & -s_3 a_{31} & -s_3 a_{32} & -s_3 a_{33} & -s_3 \\
 a_{41} & a_{42} & a_{43} & 1 & & & & & -s_4 a_{41} & -s_4 a_{42} & -s_4 a_{43} & -s_4 \\
 a_{51} & a_{52} & a_{53} & 1 & & & & & -s_5 a_{51} & -s_5 a_{52} & -s_5 a_{53} & -s_5 \\
 a_{61} & a_{62} & a_{63} & 1 & & & & & -s_6 a_{61} & -s_6 a_{62} & -s_6 a_{63} & -s_6 \\
 & & & & a_{11} & a_{12} & a_{13} & 1 & -t_1 a_{11} & -t_1 a_{12} & -t_1 a_{13} & -t_1 \\
 & & & & a_{21} & a_{22} & a_{23} & 1 & -t_2 a_{21} & -t_2 a_{22} & -t_2 a_{23} & -t_2 \\
 & & & & a_{31} & a_{32} & a_{33} & 1 & -t_3 a_{31} & -t_3 a_{32} & -t_3 a_{33} & -t_3 \\
 & & & & a_{41} & a_{42} & a_{43} & 1 & -t_4 a_{41} & -t_4 a_{42} & -t_4 a_{43} & -t_4 \\
 & & & & a_{51} & a_{52} & a_{53} & 1 & -t_5 a_{51} & -t_5 a_{52} & -t_5 a_{53} & -t_5 \\
 & & & & a_{61} & a_{62} & a_{63} & 1 & -t_6 a_{61} & -t_6 a_{62} & -t_6 a_{63} & -t_6
 \end{pmatrix} \mathbf{m} = 0$$

これに対して左基本変換を行うことで、上三角行列の形にして m について解くことで、 M が求まる。 M は見かけ上12個の成分を持つが、定数倍の自由度を持つことから一意には決まらない。そこで、 m_{43} を k とおいて、

$$k \begin{pmatrix} m'_{11} & m'_{12} & m'_{13} \\ m'_{21} & m'_{22} & m'_{23} \\ m'_{31} & m'_{32} & m'_{33} \\ m'_{41} & m'_{42} & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{B.13})$$

を求めらる。

一方行列 M は、ワールド座標系で表される空間上の点 $P(p)$ を、理想スクリーン座標系で表される点 $x(x)$ に投影する変換を表している。その時の視点を $e(e)$ 、視点から画像面におろした垂直の足を $z_0(z_0)$ とし、その $z_0(z_0)$ が画像面では原点となって、単位ベクトル ω_1 、 ω_2 の方向にそれぞれの画面上の x 軸、 y 軸がとられているものとする。図 B.1 に各ベクトルの関係を示す。

すると、行列 M は次のように表される。

であることから、 T_{cm}^- は、

$$T_{cm}^- = P^- \begin{pmatrix} M^T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{B.19})$$

となり、作業員の三次元位置・姿勢を表す行列 T_{cm}^- を得ることができる。